

## **General Disclaimer**

### **One or more of the Following Statements may affect this Document**

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available as much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures, which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

E82-10175  
CR-168598



SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

"Made available under NASA sponsorship  
in the interest of early and wide dis-  
semination of Earth Resources Survey  
Program information and without liability  
for any use made thereof."

(E82-10175) REMOTE SENSING APPLIED TO  
AGRICULTURE: BASIC PRINCIPLES, METHODOLOGY,  
AND APPLICATIONS (Instituto de Pesquisas  
Espaciais, Sao Jose) 87 p HC A05/MF A01

N82-22610


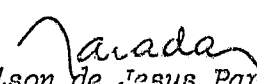
Unclass

CSSL 02C G3/43 00175

~~RECEIVED BY  
NASA STI F. 11772  
DATE: NOV 25 1981  
DC. 4. 1. 002949  
☒ EST-008 ☐ 1111~~



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

|   |                   |   |  |
|---|-------------------|---|--|
| 1. Publicação nº<br>INPE-2225-MD/012  | 2. Versão         | 3. Data<br>Set., 1981   | 5. Distribuição<br><input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa<br><input type="checkbox"/> Restrita |
| 4. Origem<br>DSR  | Programa<br>RECAF |   |  |
| 6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es)<br>SENSORIAMENTO REMOTO LANDSAT<br>INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS<br>AGRICULTURA  |                   |   |  |
| 7. C.D.U.: 528.711.7:63   |                   |   |  |
| 8. Título<br><br>SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA:<br>PRINCIPIOS BÁSICOS, METODOLOGIA<br>E APLICAÇÕES  |                   | 10. Páginas: 87   |  |
|   |                   | 11. Última página: 81   |  |
|   |                   | 12. Revisada por  |  |
| 9. Autoria Francisco José Mendonça  |                   | Antonio Tebaldi Tardin<br>Antonio Tebaldi Tardin  |  |
|   |                   | 13. Autorizada por  |  |
| Assinatura responsável   |                   | <br>Nelson de Jesus Parada<br>Diretor |  |
| 14. Resumo/Notas<br><p>O presente trabalho trata, fundamentalmente, dos princípios básicos do Sensoriamento Remoto aplicados à Agricultura e de sua metodologia de tratamento dos dados. No Capítulo 1 foi feita uma revisão de literatura sobre a aplicação, em outros países, fora do Brasil, do Sensoriamento Remoto aplicado à Agricultura. No Capítulo 2 mostrou-se de modo teórico, o comportamento espectral das culturas - a reflectância, transmitância e absorvância das plantas - solo, e planta e suas interações com a energia refletida - morfologia da folha e sua interação com a energia solar - radiação solar e as plantas - propriedades e mecanismo de reflectância de folhas no infravermelho - fatores que afetam a reflectância da cobertura vegetal e um breve estudo sobre o uso de filme infravermelho para detecção de anomalias em culturas. No Capítulo 3 descreveu-se uma metodologia de utilização de dados do LANDSAT em áreas, tratadas visual e automaticamente. No Capítulo 4, finalmente, foi feita uma revisão de literatura sobre a utilização de técnicas de sensoriamento remoto com dados de satélite e avião, aplicados à Agricultura e realizados pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE).</p> |                   |   |  |
| 15. Observações   |                   | Original photography may be purchased from<br>EROS Data Center<br><br>Sioux Falls, SD 57198                               |  |

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY.

#### ABSTRACT

*This paper provides the principles of remote sensing techniques applied to agriculture and the methods for data analysis. In Chapter 1 literature review shows some examples of remote sensing applied to agriculture in other countries. Chapter 2 shows the theoretical spectral responses of crops; reflectance, transmittance and absorbance of plants; plants, soil and their interactions with the reflectance energy; leaf morphology and its interaction with solar energy; solar radiation and plants, properties and mechanisms of leaf reflectance in infrared region; factors which affect the reflectance of vegetation cover, and also a case study using infrared film to detect crop anomalies. In Chapter 3, the methodology of visual and computer-aided analyses of LANDSAT data in agriculture are presented. Finally, in Chapter 4, reviews were made about the studies carried out at INPE in agronomy group using airplane/satellite data and remote sensing techniques.*

## SUMÁRIO

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | v           |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....  | 1           |
| 1.1 - Sensoriamento remoto aplicado à agricultura .....   | 1           |
| 1.2 - Uso de dados do LANDSAT aplicados à agricultura .....                                     | 3           |
| 1.3 - Métodos de tratamento de dados de agricultura obtidos através do LANDSAT .....            | 6           |
| <u>CAPÍTULO 2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS CULTURAS AGRÍCOLAS</u> ....                         | 9           |
| 2.1 - Reflectância, transmitância e absorvância das plantas .....                               | 10          |
| 2.2 - Solo e Planta e suas interações com a energia refletida ...                               | 13          |
| 2.3 - Morfologia da folha e sua interação com a energia solar ...                               | 14          |
| 2.4 - Radiação solar e as plantas .....   | 18          |
| 2.5 - Propriedades e mecanismo de reflectância de folhas no infravermelho .....                 | 21          |
| 2.6 - Fatores que afetam a reflectância da cobertura vegetal ....                               | 25          |
| 2.7 - Uso de filme infravermelho para detecção de anomalias em culturas .....                   | 26          |
| 2.7.1 - Processo de formação de imagem em filme infravermelho ...                               | 27          |
| <u>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DE DADOS DO LANDSAT EM ÁREAS AGRÍCOLAS</u> .....      | 33          |
| 3.1 - Metodologia de tratamento e análise dos dados .....                                       | 36          |
| 3.1.1 - Tratamento dos dados terrestres .....   | 36          |
| 3.1.2 - Tratamento dos dados suborbitais .....  | 38          |
| 3.1.3 - Tratamento dos dados orbitais .....   | 44          |
| 3.1.3.1 - Avaliação da precisão de identificação dos dados do LANDSAT .....                     | 56          |
| <u>CAPÍTULO 4 - APLICAÇÕES DO PROGRAMA DE SENSORIAMENTO REMOTO DO INPE NA AGRICULTURA</u> ..... | 63          |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 75          |

LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.1 - Média de resposta multiespectral das culturas de algodão, cana de açúcar e citrus .....   | 9           |
| 2.2 - Reflectância, absortância e transmitância de uma folha ....   | 11          |
| 2.3 - Seção transversal de uma folha que mostra a resposta da energia incidente em várias faixas do espectro .....  | 12          |
| 2.4 - Esquema de interação da energia solar com a folha e sensor .  | 15          |
| 2.5 - Distribuição espectral da radiação solar em dia claro e em dia nublado .....  | 19          |
| 2.6 - Transmissão atmosférica .....   | 20          |
| 2.7 - Distribuição espectral da luz direta do sol e da luz através da vegetação .....   | 20          |
| 2.8 - Curva da radiação solar ao nível do mar .....   | 21          |
| 2.9 - Espectro de reflectância de uma folha de milho .....  | 22          |
| 2.10 - Espectro de reflectância de uma folha verde e uma albina de gerânio .....  | 23          |
| 2.11 - Espectro de reflectância de uma folha de feijão normal e infiltrada com água .....   | 23          |
| 2.12 - Espectro de reflectância de folha de feijão com diferentes teores de umidade .....   | 24          |
| 2.13 - Curva de sensibilidade espectral do filme .....  | 28          |
| 3.1 - Diagrama esquemático da operação do sistema .....   | 35          |
| 3.2 - Ciclo cultural da cana-de-açúcar .....  | 37          |
| 3.3 - Ciclo cultural do trigo .....   | 38          |
| 3.4 - Fotografia colorida no infravermelho que mostra padrões fotográficos dos temas trigo (T), cevada (C), pousio (PS), solo preparado para cultura (SP), pastagem (P) e vegetação arborea (M) ..... | 43          |
| 3.5 - Conceito de levantamentos em "Multiestágios" .....  | 46          |
| 3.6 - Representação esquemática do ciclo de desenvolvimento de duas culturas .....  | 47          |
| 3.7 - Chave de interpretação de cana-de-açúcar, utilizando-se imagens LANDSAT, segundo suas variações espectral e temporal ..   | 47          |
| 3.8 - Configuração do IMAGE-100, mostrando os seus componentes ...  | 50          |
| 3.9 - Ilustração da "máxima verossimilhança" .....  | 52          |
| 3.10 - Identificação de cana-de-açúcar através de fotografias aéreas  | 54          |
| 3.11 - Saída de classificação automática de cana através do subsistema DICOMED .....  | 55          |

|  | Pág. |
|--|------|
| 3.12 - Saída de classificação automática de cana através do subsistema IMPRESSORA .....  | 55   |
| 3.13 - Área mapeada com cana-de-açúcar através de imagens LANDSAT tratadas visualmente .....   | 57   |
| 3.14 - Supervisão da interpretação visual de fotografia aérea sobre a mesma área, classificada automaticamente, a partir de dados digitalizados do LANDSAT .....           | 60   |
| 3.15 - Esquema demonstrativo dos elementos para avaliação de dados obtidos com a classificação automática de cultura agrícola. ....  | 60   |
| 4.1 - Mapa de situação que mostra a "área de estudo" representada pela DIRA-RP, e a "área piloto" representada pelo Município de Jardinópolis no Estado de São Paulo ..... | 64   |
| 4.2 - Localização da área de estudo, delimitada na imagem LANDSAT (178/27) na Divisão Regional Agrícola de Ribeirão Preto (DIRA/RP) .....                                  | 66   |
| 4.3 - Localização da área de estudo em relação ao Estado de São Paulo .....  | 70   |
| 4.4 - Distribuição das áreas de treinamento dentro de cada estrato em relação ao Estado de São Paulo .....   | 70   |
| 4.5 - Mapa temático da cultura de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, obtido através de imagens do LANDSAT .....  | 72   |
| 4.6 - Área de estudo e os três segmentos de 20 km x 40 km .....  | 74   |

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto é uma técnica que pode ser utilizada como mais uma ferramenta para o estudo e pesquisa dos muitos problemas das ciências ligadas, principalmente, aos recursos naturais.

A agricultura que integra o rol das ciências que lidam com recursos naturais pode se beneficiar com a técnica de Sensoriamento Remoto para estudar e solucionar problemas que necessitam ser tratados, harmonicamente e rapidamente, dentro de uma visão global.

Em particular, a agricultura brasileira - que apresenta características em função da dimensão territorial do País, das suas diferentes condições ecológicas, sócio-econômicas e de infra-estrutura - requer, em virtude dessa realidade, que todos esses fatores sejam levados em consideração quando do planejamento de quaisquer trabalhos de pesquisa ou de exploração agrícola.

Apesar de existir uma vasta literatura sobre o assunto em outros países, no Brasil é ainda muito escassa. Este trabalho tem por objetivo, além de preencher essa lacuna, oferecer os princípios básicos do sensoriamento remoto aplicados à Agricultura e à sua metodologia de tratamento dos dados, sejam eles obtidos em terra, por avião ou através de plataformas orbitais.

#### 1.1 - SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA

Com a utilização de dispositivos sensores colocados em aviões ou satélites, com o objetivo de obter informações acerca de objetos ou fenômenos da superfície da Terra, mediante a aferição das trocas energéticas entre aqueles fenômenos ou objetos com o meio ambiente, o sensoriamento remoto apresenta três importantes características: *rapidez, repetitividade e poder de análise multiespectral.*



Com tais características, o uso de técnicas de sensoriamento remoto presta-se, eficientemente a planejamentos, estudos e levantamentos em agricultura.

A análise das características multiespectrais de dados agrícolas se constitui na principal técnica de sensoriamento remoto para a realização de estudos de identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas e inventários agrícolas.

Segundo Myers (1975), o sensoriamento remoto oferece uma oportunidade de acompanhamento e avaliações, rápidas e frequentes, de áreas agrícolas. Com efeito, dadas as características complexas das culturas agrícolas, sujeitas a contínuas variações, torna-se extremamente difícil a sua análise. Assim sendo, um programa que utiliza sensoriamento remoto para o estudo de culturas agrícolas requer um conhecimento das plantas e suas interações com a energia eletromagnética..

De acordo com o LARS (Laboratory for Agricultural Remote Sensing, 1968) o sensoriamento remoto tem sido aplicado à Agricultura para atender a três objetivos básicos: 1) identificar, de acordo com os padrões de resposta espectral, as diversas categorias de culturas agrícolas; 2) estabelecer para essas diversas categorias a faixa de melhor discriminação no espectro eletromagnético; e, 3) determinar, em função do estágio de desenvolvimento das culturas, de acordo com as variações temporais e as diferentes condições de solo, os padrões de resposta multiespectral para os diferentes grupos ou categorias de culturas.

Um exemplo de aplicação de sensoriamento remoto à Agricultura foi o Projeto LACIE (Large area crop inventory experiment), desenvolvido nos Estados Unidos, que tem como meta principal, segundo MacDonald e Hall (1978), o desenvolvimento de uma tecnologia de levantamento de safras, através de sensoriamento remoto, capaz de proporcionar informações sobre produção de alimentos e fibras do Globo. O Projeto LACIE, de acordo com os autores citados, foi um programa que se

guiu uma sequência ordenada, em função do avanço tecnológico. Foi iniciado com o reconhecimento automático da cultura de trigo, através de computador, usando dados multiespectrais coletados por aeronave em 1966 e culminando com os testes de imagens de satélite em 1972.

## 1.2 - USO DE DADOS DO LANDSAT APLICADOS À AGRICULTURA

Para determinar a potencialidade dos dados coletados pelo LANDSAT-1, nas áreas de Agricultura e Recursos Florestais, Erb (1973) chegou às seguintes conclusões:

- 1) Os dados do LANDSAT-1 podem ser usados para detectar, identificar, localizar e medir uma grande quantidade de padrões de interesse para as áreas de Agricultura e Floresta;
- 2) informação extraída de dados do LANDSAT-1 presta-se grandemente à realização de estudos em grandes áreas;
- 3) as técnicas de análise que utilizam computador são tão boas quanto a interpretação convencional em imagem e a utilização das duas técnicas seria muito útil no levantamento de recursos terrestres;
- 4) o desempenho de classificação com dados do LANDSAT-1 é compatível com o desempenho que se obtém utilizando-se dados de fotografias aéreas; e
- 5) a praticabilidade de classificação em grandes áreas de recursos agrícolas e florestais ficou comprovada, em virtude de os elementos de órgãos oficiais continuarem trabalhando com a NASA, para obtenção de aplicações específicas.

Horton e Heilman (1973) utilizaram dados do LANDSAT, para a identificação das culturas de milho e soja e de área com solo descoberto (solo nu), em área selecionada do sudeste de Dakota do Sul. Os

resultados obtidos, utilizando-se as bandas 5 e 7, foram muito bons, permitindo uma classificação totalmente distinta das culturas de milho e soja.

Schrumpf (1973), utilizando dados orbitais do LANDSAT, afirma que eles possuem características bem definidas, permitindo realizar inventários de vegetação natural.

A partir de dados do LANDSAT-1, para análise de culturas agrícolas e florestais de Michigan, através de tratamento automático, Safir et alii (1973) concluíram que, de um modo geral, o reconhecimento de classes de vegetação é bom, desde que as copas ou folhagens das plantas apresentem um padrão uniforme, notadamente se essas plantas já atingiram a fase de maturação. Com efeito, a precisão da classificação, segundo os autores, depende do estágio de desenvolvimento da planta e da época de coleta de dados.

Misra e Wheeler (1978), utilizando dados multiespectrais do MSS (Multispectral Scanner Subsystem) do LANDSAT, afirmam que a noção de resposta espectral, tomada como base exclusiva para classificação de temas, não parece satisfatória. De acordo com esses autores, a resposta espectral de dados de agricultura é grandemente afetada, dependendo da época em que são tomadas. Assim sendo, concluem eles, para a classificação das culturas é necessário associar as variações espectral e temporal.

Wigton e Steen (1973), em trabalho de identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas, a partir de dados do LANDSAT em áreas selecionadas do Missouri, Kansas, Idaho e Dakota do Sul, explicam o baixo desempenho da classificação obtida (58,8%) como uma consequência de grandes variações nas culturas plantadas em diferentes solos.

Westin e Lemme (1978) estudaram o efeito do solo e da vegetação sobre as respostas espectrais do LANDSAT. Associações de seis solos utilizados com milho, pequenos grãos e pastagens de gramíneas foram analisados, utilizando-se duas datas correspondentes à estação de crescimento, com o objetivo de tentar separar categorias de uso agrícola e detectar a influência da associação de solo sobre as assinaturas espectrais da vegetação e do solo nu. Os dados de 19 de abril se prestaram bem para separar os campos de cultura dos campos de pasto e para localizar áreas alagadas. As diferenças de solo, no que se refere às propriedades espectrais, mostraram-se mais acentuadas em relação às áreas de pasto do que às áreas ocupadas com culturas. Os dados de 30 de junho mostraram que as associações de solo não podiam, consistentemente, ser separadas a partir de dados provenientes de um único tipo de vegetação.

Entretanto os resultados mostraram que os solos, de algum modo, influenciaram a resposta espectral da vegetação. Dado que os solos interferiram na reflectância espectral dos vegetais, os autores tomaram, para cada uma das seis associações de solo, pontos para treinamento, a fim de separar quatro categorias de uso agrícola. Uma precisão de 94% foi obtida.

Os mesmos autores, citando Hoffer, dizem que a variação nos solos podem causar diferenças nas respostas espectrais de cada cultura. A seguir, citando Kauth e Thomas, comentam que muito embora a cobertura vegetal de um campo de cultura, em estágio avançado de crescimento, elimine a influência dos solos, as culturas localizadas em diferentes solos não são plantadas igualmente na mesma data, e nem crescem com a mesma taxa de desenvolvimento nos diferentes tipos de solo.

Wiegand et alii (1973), em trabalho realizado para deduzir, a partir de respostas espectrais do MSS do LANDSAT-1, a densidade de biomassa vegetal, afirmam que as respostas dos dados do LANDSAT-1 podem estar relacionadas ao estágio de desenvolvimento das culturas, o que possibilita, juntamente com a análise espectral, a escolha da época mais propícia para a análise de uma cultura. Segundo os autores, fa

tores como percentagem de cobertura do solo pelas culturas e porte das plantas são, entre outros, parâmetros que, de uma maneira ou de outra, devem influir na resposta espectral dos dados de satélite.

### 1.3 - MÉTODOS DE TRATAMENTO DE DADOS DE AGRICULTURA OBTIDOS ATRAVÉS DO LANDSAT

Segundo Bauer (1976), a análise de dados obtidos por sensoramento remoto pode ser feita através de dois métodos: *análise visual* e *análise automática da imagem*. Na análise automática de dados de sensoramento remoto, utilizam-se fundamentalmente as variações espectrais. Todavia, conforme as circunstâncias, são utilizadas também informações temporais e espaciais, em complementação às informações, provenientes das variações espectrais.

Draeger et alii (1973) desenvolveram, a partir de um sistema integrado, um trabalho que utiliza tanto o homem como o computador, tomando como suporte dados terrestres, fotografias tiradas de avião e imagens obtidas por satélite, com o objetivo de inventariar áreas ocupadas com culturas, a nível regional. A seguir são apresentados os passos utilizados:

- 1) procedeu-se, inicialmente, a um delineamento de estratos homogêneos, dentro de uma imagem do LANDSAT, realizado por fotointerpretes;
- 2) fez-se a classificação ponto a ponto da área, dentro de cada estrato, com base no tipo de cultura, usando-se um sistema de processamento de dados digitalizados, mediante uma interação homem e máquina; e
- 3) realizou-se, através de áreas previamente seleccionadas com informações tanto de dados de fotografias áreas como de verdade terrestre, a verificação e correção da classificação, obtida a partir de dados de satélite.

Dietrich et alii (1975) realizaram um estudo no qual, utilizando dados digitalizados do LANDSAT, fizeram a identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas, usando para análise o sistema interativo IMAGE-100 (I-100). Segundo os autores, a análise dos dados digitalizados do LANDSAT, através do sistema I-100, é uma técnica eficiente, rápida e de grande potencialidade.

Johnson e Coleman (1973) afirmam que a obtenção de informações sobre as culturas, com a finalidade de gerar inventários agrícolas poderá ser feita combinando-se da melhor maneira possível, a capacidade do homem com a agilidade da máquina; daí obter-se-ão resultados rápidos.

Em trabalho realizado no nordeste de Illinois, através de análise automática dos dados do MSS do LANDSAT, Bauer e Cipra (1973) mostraram que esse método é eficiente para identificação de culturas em grandes áreas, ao obter um desempenho de 83% na classificação de milho e soja, naquela região.

Segundo Hall et alii (1974), um grande problema na classificação automática de culturas, usando dados de satélite, é a escolha correta de áreas, utilizadas para treinamento de computador, principalmente quando estas áreas estão localizadas próximas ou na interseção de dois temas agrícolas distintos, mas de padrão espectral bastante semelhante. Nesta situação, concluem os autores, é de todo conveniente não tomar estas áreas para treinamento.

Para medir a precisão da classificação de diferentes usos da terra, a partir de dados de satélite, Landgrebe (1973) utilizou o método de amostragem, que consistiu na escolha de áreas retangulares, totalmente controladas de acordo com os diferentes usos da terra; através destas áreas, foi determinada a precisão para cada classe.

O passo inicial para se proceder a um inventário de culturas, segundo trabalho realizado por Draeger (1973), na Califórnia, a partir de imagens de satélite, foi a estratificação das categorias de uso da terra e classes de cultura. Pelos resultados obtidos, ele concluiu que é extremamente importante o delineamento de estratos realmente significativos, feito pelo intérprete, e que a combinação dessa decisão humana com a capacidade mecânica de classificação dos sistemas automáticos constitui-se em poderoso recurso de tratamento de informações de interesse agrícola, a nível de grandes regiões.

Em trabalho realizado no condado de Greeley, Kansas, Baumgardner e Henderson (1973) identificaram a partir de fotografias no infravermelho coloridas, três temas: *trigo*, *solo nu* e *pastagem permanen*te. As áreas ocupadas com cada um desses temas foram utilizadas como área de treinamento para classificação automática, utilizando-se dados orbitais do satélite LANDSAT-1, cujos resultados em term de precisão, medidos em relação aos dados obtidos por avião, foram os seguintes: pasto (96,1%), trigo (97,0%) e solo nu (97,9%).

## CAPÍTULO 2

### COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS CULTURAS AGRÍCOLAS

As culturas agrícolas respondem, caracteristicamente, dentro do espectro eletromagnético, segundo os diferentes comprimentos de onda. Assim, é muito importante o estabelecimento da faixa de melhor discriminação no espectro eletromagnético, para as diversas culturas. Na Figura 2.1, foi traçado o comportamento espectral da cultura de algodão, cana-de-açúcar e citrus. Conforme se pode ver, é na faixa do infravermelho próximo (900 a 1100 nm) onde ocorreu maior discriminação entre as três culturas.

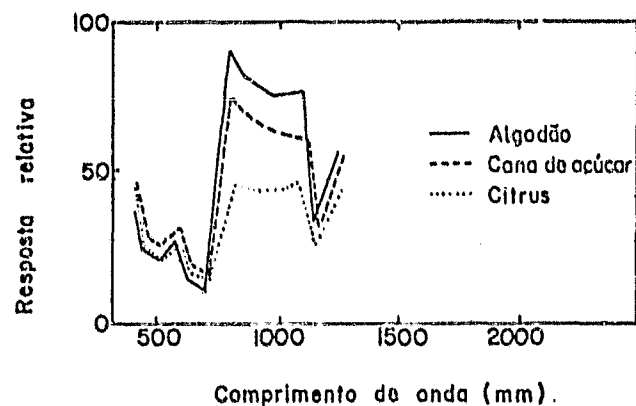


Fig. 2.1 - Média de resposta multiespectral das culturas de algodão, cana-de-açúcar e citrus.

Na área de agricultura, as faixas mais utilizadas do espectro eletromagnético são as do visível (450-780 nm), infravermelho (780-1100 nm) e termal (8000-14000 nm). A faixa de microondas também é utilizada, principalmente através de Radar. Todavia, a aplicação dessa faixa do espectro eletromagnético ao estudo de alvos agrícolas é ainda bastante restrita.



## 2.1 - REFLECTÂNCIA, TRANSMITÂNCIA E ABSORTÂNCIA DAS PLANTAS

O modo como uma planta ou uma comunidade de plantas é vista, seja pelo olho humano ou por um sensor multiespectral, depende fundamentalmente da interação dessa planta ou comunidade de plantas com a radiação.

Esse relacionamento planta-energia, segundo Gates (1970), se dá basicamente através de duas modalidades: *ativamente*, através da reflectância da luz solar, e *passivamente*, pela emitância da radiação termal.

A qualidade e intensidade espectral da reflectância e emitância das plantas são funções de uma série de variações, tais como: geometria, morfologia, fisiologia, composição química da folha, tipo de solo e influências climáticas.

Os dois componentes presentes na folha de uma planta são: as células dos pigmentos e a água em solução. Esses componentes são os responsáveis pelas características de reflectância e transmitância da radiação incidente sobre a folha de uma planta.

Na Figura 2.2, pode-se ver que somente uma parte da energia incidente é refletida da folha. O restante é absorvido ou transmitido. Conforme esse gráfico, no intervalo do ultravioleta ao azul há uma forte absortância da radiação incidente; na faixa do verde, essa absortância decresce; no vermelho a absortância cresce novamente; na faixa do infravermelho próximo, a absortância é fortemente reduzida, com o conseqüente aumento da reflectância e transmitância; e finalmente, no infravermelho distante, ocorre uma forte absortância da energia incidente na folha.

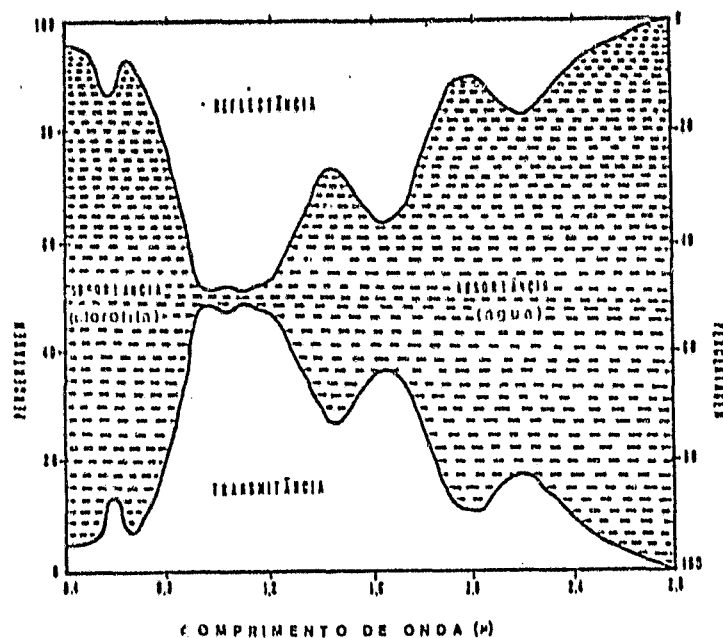


Fig. 2.2 - Reflectância, absortância e transmitância de uma folha.

FONTE: Knipling (1970), p.156.

A Figura 2.3 mostra a seção transversal de uma folha, onde se pode ver a resposta de energia incidente em várias faixas do espectro eletromagnético.

Segundo Gates (1970) uma pequena parte da luz que incide sobre uma folha é refletida pela cutícula da folha; a restante, em maior parte, penetra até o mesofilo esponjoso, onde os raios sofrem desvios nas numerosas paredes das células. Aí, devido às mudanças dos índices de refração das paredes celulares, ocorre a chamada reflexão de Fresnel. A múltipla reflexão é feita ao acaso, de acordo com as frequentes mudanças de direção do raio de luz dentro da folha. Por causa das paredes celulares, os raios de luz sofrem uma série de desvios, sendo uma parte retrorefletida e a outra transmitida. Geralmente a transmitância ocorre em maior grau que a reflectância nas folhas delgadas, enquanto nas folhas espessas ocorre o inverso. As folhas escuras e espessas das plantas xerófilas e os galhos polpudos dos cactos possuem baixa transmitância e refletem fortemente no infravermelho próximo. É bem significativa

tivo o índice de reflectância que ocorre nas camadas mais externas da cutícula cerosa e espessa que cobrem muitas plantas suculentas.

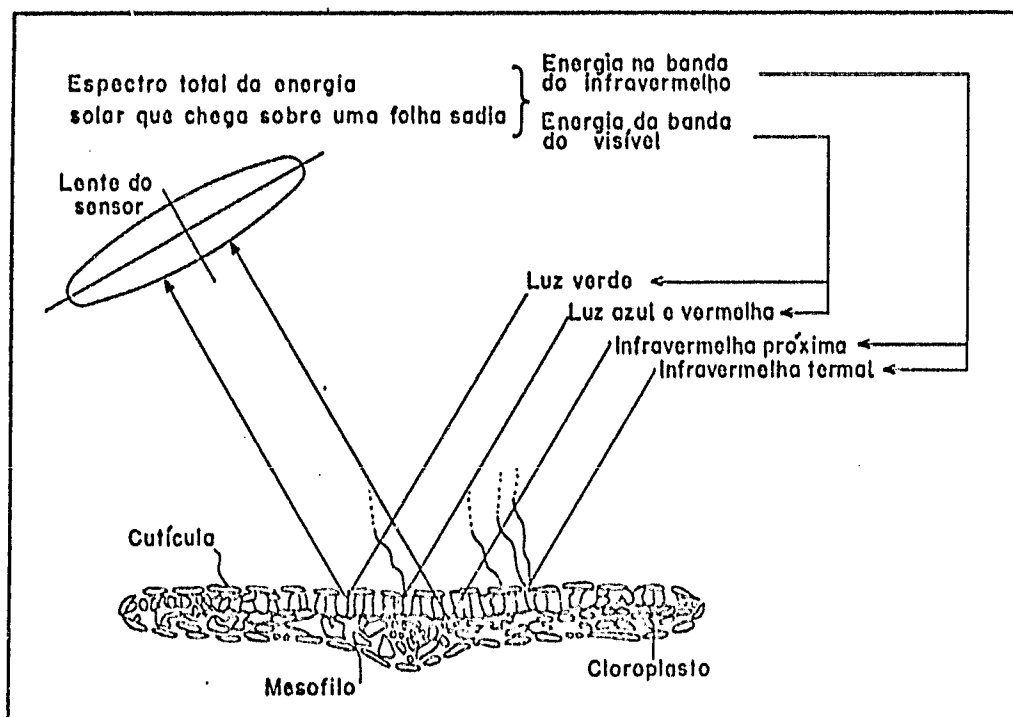


Fig. 2.3 - Seção transversal de uma folha que mostra a resposta da energia incidente em várias faixas do espectro.

FONTE: Wallace (1973), p. 954.

As faixas de absorvância dos pigmentos e da água, segundo ainda Gates (1970), são fisicamente muito diferentes. As absorvâncias dos pigmentos da folha são usadas para promover as transições dos elétrons dentro dos complexos pigmentos moleculares. Já as absorvâncias de água promovem as transições dos estados vibratórios e rotacionais das moléculas de água. As transições do elétron requerem energias mais altas que as transições vibratórias e rotacionais. Nas faixas do ultravioleta e visível ocorre a absorvância para promover as transições eletrônicas, enquanto para promover as transições vibratórias e rotacionais das moléculas de água, as faixas são as do infravermelho.

A folha, ao atingir a maturidade, permanece com seu índice de reflectância, absorvância e transmitância inalterados, até que agentes externos alterem tal estabilidade. Entre os fatores que podem afetar a reflectância de uma folha adulta podem ser citados: 1) alteração na pigmentação; 2) modificação na estrutura das células do mesófilo; 3) mudança no teor de umidade; e 4) alterações na superfície da folha, em função do estágio de desenvolvimento da planta, ou devido à incidência de doenças e pragas sobre essa superfície.

## 2.2 - SOLO E PLANTA E SUAS INTERAÇÕES COM A ENERGIA REFLETIDA

Uma das causas conhecidas da variação na reflectância de uma certa área ocupada com culturas, na opinião de Myers et alii (1970), é a densidade foliar ou o índice de área foliar das plantas, o qual é definido como a razão de área foliar sobre a área do solo.

A cobertura vegetal de uma comunidade de plantas, segundo Knipling (1969), possui características estruturais e geométricas que influenciam as propriedades ópticas dessa cobertura vegetal. A integração dessas características compõe os padrões de resposta espectral recebidos pelos sensores aerotransportados.

Para melhor entender a interação da energia com o solo e plantas Gates (1970) estabeleceu, numa primeira aproximação, a seguinte equação:

$$E(s + p) = [ (1 - f) r_p + f r_s ] (L + \ell) \quad (2.1)$$

onde  $E(s + p)$  é a energia refletida do solo e das plantas conjuntamente;  $f$ , a fração da superfície do solo descoberto;  $r_p$ , a refletividade de das plantas;  $r_s$ , a refletividade do solo; e  $(L + \ell)$ , a luz direta do solo e a luz direta do céu, conjuntamente.

A Equação 2.1, pode ser assim também escrita:

$$E(s + p) = f + (1 - f) r_p/r_s \quad (2.2)$$

Isto demonstra que a energia refletida, no caso de alvos agrícolas, depende de duas componentes: da fração " $f$ " e da refletividade de das plantas sobre a refletividade do solo ( $r_p/r_s$ ). Quando há predominância de solo exposto sobre a folhagem das culturas, a razão  $r_p/r_s$  é menor que 1 e, na parte visível do espectro, a resposta de energia refletida é forte, devido ao alto valor de " $f$ ". Quando há predominância de cobertura vegetal, a razão  $r_p/r_s$  é maior que 1, e a resposta de energia mais forte ocorre no intervalo do infravermelho próximo; nesse caso, " $f$ " é muito pequeno ou nulo.

### 2.3 - MORFOLOGIA DA FOLHA E SUA INTERAÇÃO COM A ENERGIA SOLAR

A folha de uma planta é o principal órgão responsável pela produção da fotossíntese; pois é nela que se encontram os cloroplastos, dentro dos quais estão os pigmentos da clorofila. Os cloroplastos estão localizados ao longo das paredes das células do parênquima, na parte que corresponde ao mesófilo ou à seção média da folha (Figura 2.4). As células do parênquima são preenchidas com seiva e protoplasma.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

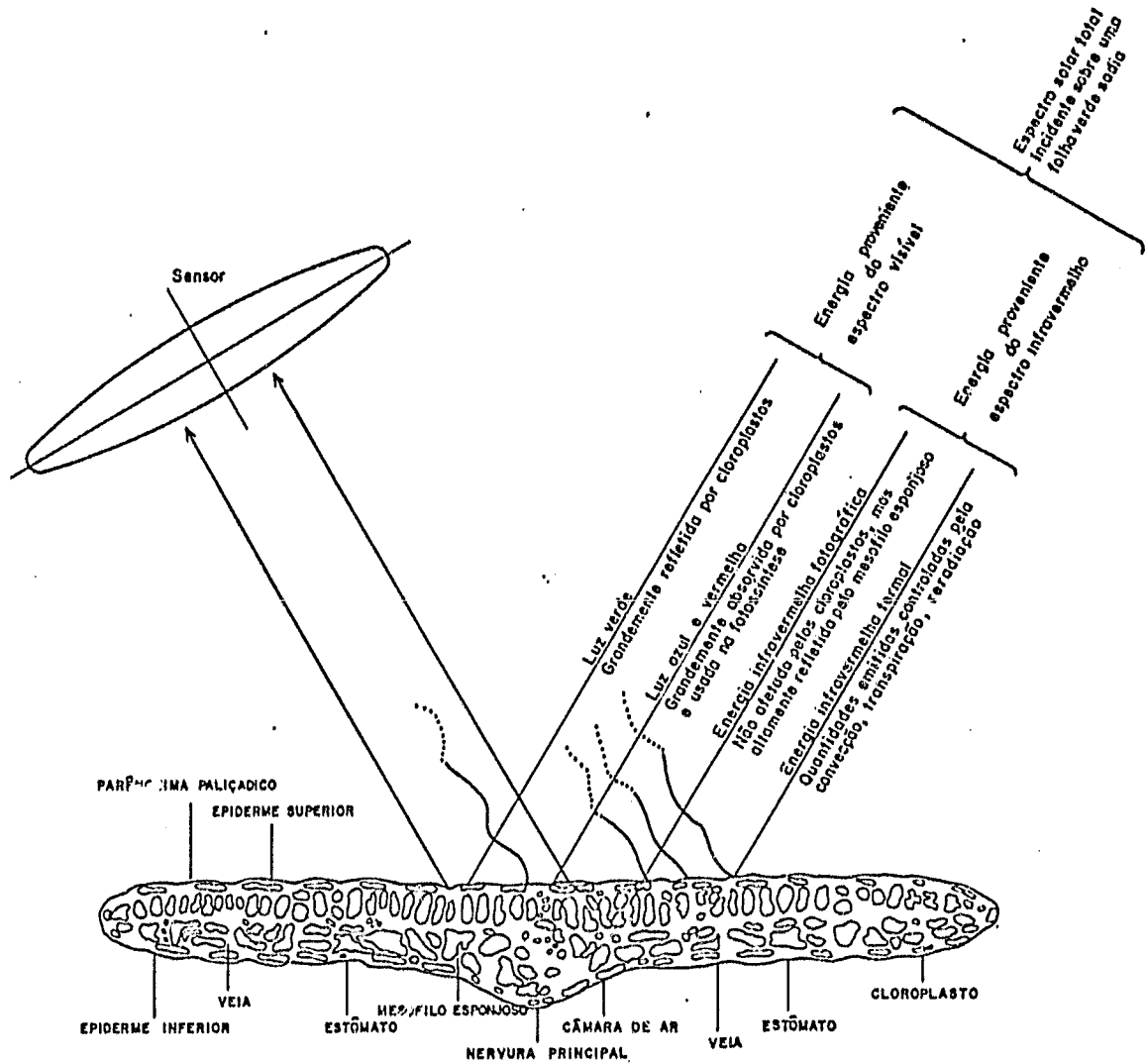


Fig. 2.4 - Esquema de interação da energia solar com a folha e sensor.

FONTE: Colwell e Olson (1966), p. 88.

A estrutura da célula das folhas varia em função da espécie e condições ambientais da cultura, ao longo do seu desenvolvimento. A grande maioria das folhas possui duas camadas distintas de células parenquimatosas: na parte superior do mesofilo (Figura 2.4) células paliçádicas alongadas e irregulares; e na parte inferior do mesofilo, células esponjosas, arrançadas frouxamente. As células paliçádicas formam-se na parte da folha que recebe diretamente a energia luminosa. Na maior parte das folhas posicionadas horizontalmente, as células paliçádicas se encontram na parte superior, enquanto folhas posicionadas verticalmente, as referidas células paliçádicas são formadas em ambos os lados da folha. Em algumas folhas, não existem as células alongadas do tecido paliçádico, de maneira que, dentro do mesofilo, só existem as células do tecido esponjoso.

A estrutura celular da folha assemelha-se aos comprimentos de onda da luz. São as seguintes as dimensões típicas da célula de uma folha: células paliçádicas -  $15 \mu \times 15 \mu \times 60 \mu$ , as células esponjosas -  $18 \mu \times 15 \mu \times 20 \mu$ . As células da epiderme são da mesma ordem de dimensão que as células do parênquima esponjoso, e estas têm uma fina cutícula de cera, cuja espessura pode variar em torno de  $3 \mu$  a  $5 \mu$ . Os cloroplastos suspensos dentro do protoplasma celular possuem, geralmente, um diâmetro que varia de  $5 \mu$  a  $8 \mu$  e uma largura de  $1 \mu$ . Cerca de 50 cloroplastos podem estar presentes em cada célula parenquimatosa. Dentro do cloroplasto existem partículas finas e longas, denominadas grana. O granum deve ter  $0,5 \mu$  de comprimento e  $0,05 \mu$  de diâmetro. O fato dessas partículas possuírem as dimensões de comprimento de onda da luz propicia significativo espalhamento da luz dentro do cloroplasto. Na parte superior da folha, os cloroplastos são geralmente mais abundantes que na parte inferior da mesma, razão pela qual essa parte da folha se apresenta mais clara.

Tipicamente, a folha tem aberturas na forma de espaços intercelulares, os quais contêm o binômio *ar e umidade*. São os seguintes os componentes da folha que são importantes do ponto de vista da luz e radiação: *celulose* das paredes da célula; *água* que contém solutos (ions, moléculas pequenas e grandes - tais como proteínas e âcidos nucleícos) dentro da célula; *espaços intercelulares* e *pigmentos* dentro do cloroplasto.

Os principais pigmentos ativos da folha que se encontram dentro dos cloroplastos são mostrados na Tabela 2.1.

TABELA 2.1

PRINCIPAIS PIGMENTOS ATIVOS DA FOLHA E SUAS  
CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS

| NOME DO PIGMENTO   | CARACTERÍSTICA              | COMPRIMENTO DE ONDA EM NM ONDE OCORRE O PICO DE ABSORÇÃO DE CO <sub>2</sub> |
|--------------------|-----------------------------|---|
| Clorofila $\alpha$ | Verde-azulado               | 430 e 660   |
| Clorofila $\beta$  | Verde-amarelado             | 465 e 660   |
| Ficocianinas       | Azul                        | 560 e 660   |
| Caratenoides       | Vermelho-alaranjado-amarelo | 400 e 500   |

As clorofilas  $\alpha$  e  $\beta$  são as mais frequentes em plantas superiores; foram encontradas dez outras formas de clorofila, com espectro de absorção próprio.



A energia radiante interage com a estrutura foliar através da absorção e espalhamento. A energia absorvida, seletivamente, em certos comprimentos de onda pela clorofila é convertida em calor e armazenada fotoquimicamente na forma de componentes orgânicos, através da fotossíntese.

Na Figura 2.4 é mostrada uma representação esquemática da interação da energia solar com a folha e o sensor.

## 2.4 - RADIAÇÃO SOLAR E AS PLANTAS

A qualidade espectral da luz refletida ou absorvida pelas plantas depende não somente da refletância e transmitância espectral das plantas, mas também do caráter espectral da radiação incidente.

A luz do sol, ao atravessar a atmosfera da terra e atingir a superfície, é fortemente absorvida pelos gases atmosféricos, espalhados pelas moléculas do ar, aerossóis e poeiras.

A distribuição espectral da luz solar sobre a superfície da terra num dia claro e num dia com bastante cobertura de nuvem é mostrada na Figura 2.5 em que a transmissão é quase que completamente bloqueada, e oito "janelas" nas quais a absorção é relativamente pequena. A Figura 2.6 indica a transmissão da atmosfera para os vários comprimentos de onda. Na Figura 2.7 é mostrada, comparativamente, a distribuição espectral da luz direta do sol e da luz difusa do interior de uma floresta.

Como mostra a Figura 2.8 (curva da radiância espectral do sol), o maior fluxo de energia solar que atinge a terra e, consequentemente, as plantas corresponde à faixa do visível. Na faixa do infravermelho tal fluxo cai consideravelmente, o que é muito importante para as plantas. Com efeito, o fato de a folha das plantas ser um bom absorvedor na faixa do visível permite que seja utilizada aquela grande quantidade de energia para a realização dos processos fotossintéticos. Por outro lado, apesar de essas mesmas folhas das plantas serem um pobre absorvedor dos comprimentos de onda do infravermelho, são um ótimo emis

sor nessa faixa do espectro, o que do ponto de vista do sensoriamento remoto torna-se muito útil, pois é na manipulação de tal fenômeno que está baseada a técnica de estudo das plantas, através de medidas de sua temperatura. Assim, por exemplo, o estado hídrico das culturas pode ser avaliado mediante a relação entre a temperatura de radiação que pode ser remotamente determinada, e o conteúdo de água do solo. Lucht (1980), com o uso da temperatura de radiação obtida através de instrumentos sensores, e com o emprego de modelo simplificado de calor para planta, detectou estresse de água da cultura de cana-de-açúcar e, através de imagens termais, não só detectou áreas deficientes em água cultivadas com cana-de-açúcar, como também foi possível fazer a delimitação das variações dos teores de umidade do solo em áreas também cultivadas com cana-de-açúcar.

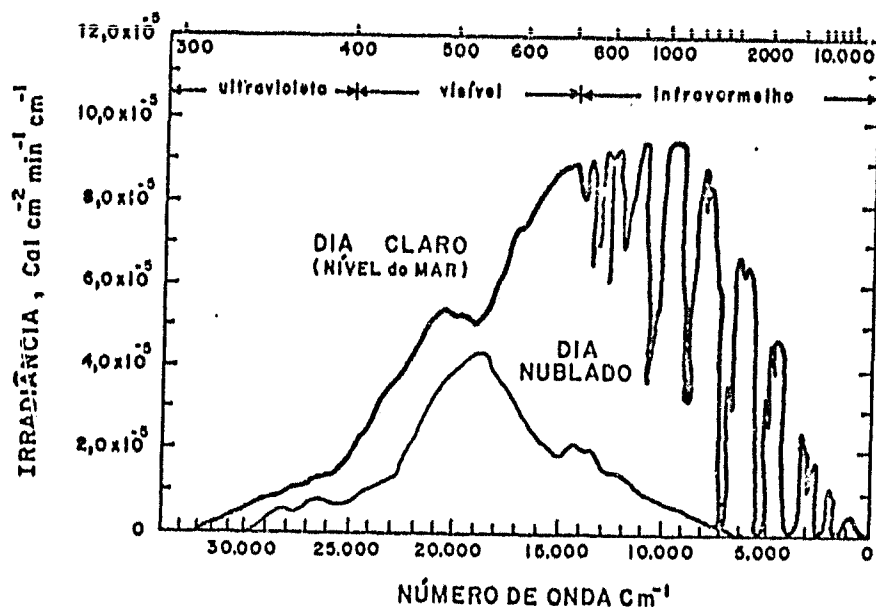


Fig. 2.5 - Distribuição espectral da radiação solar em dia claro e em dia nublado.

FONTE: Pierre et alii (1966), p. 30.

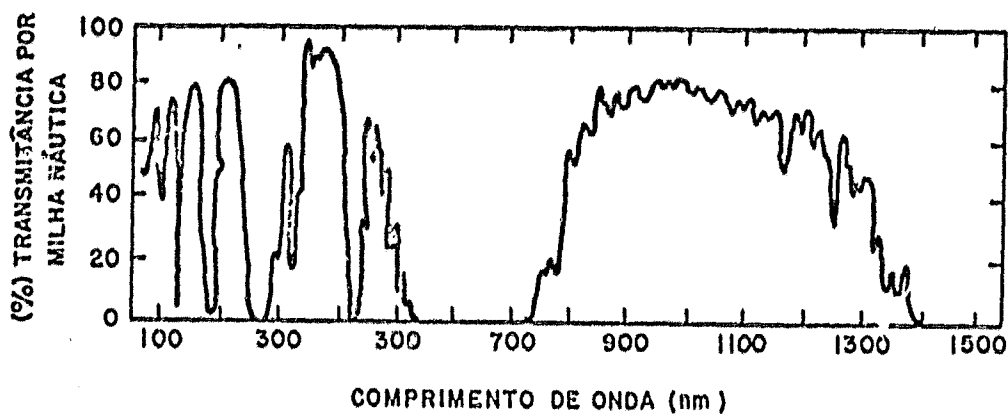


Fig. 2.6 - Transmissão atmosférica.

FONTE: Kruse et alii (1962), p. 164.

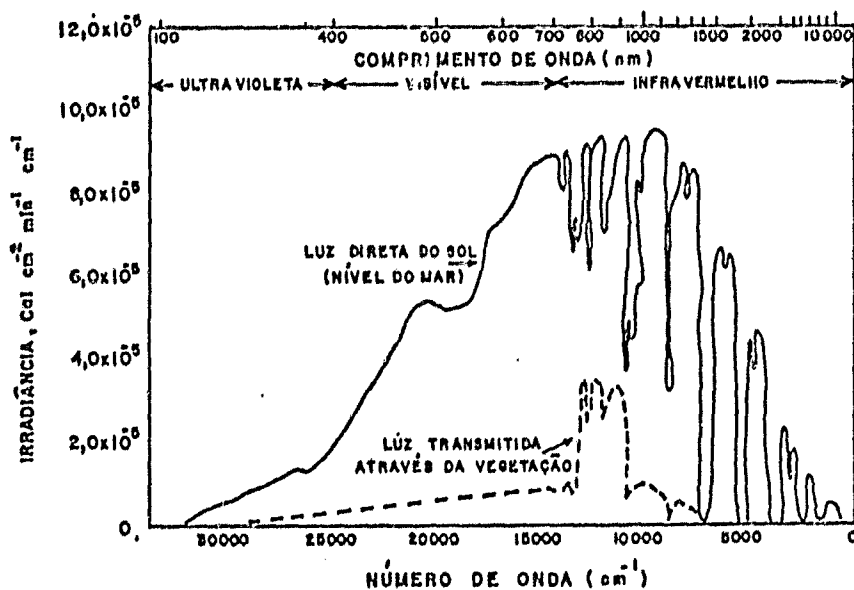


Fig. 2.7 - Distribuição espectral da luz direta do sol e da luz através de vegetação.

FONTE: Gates (1970) p. 237.

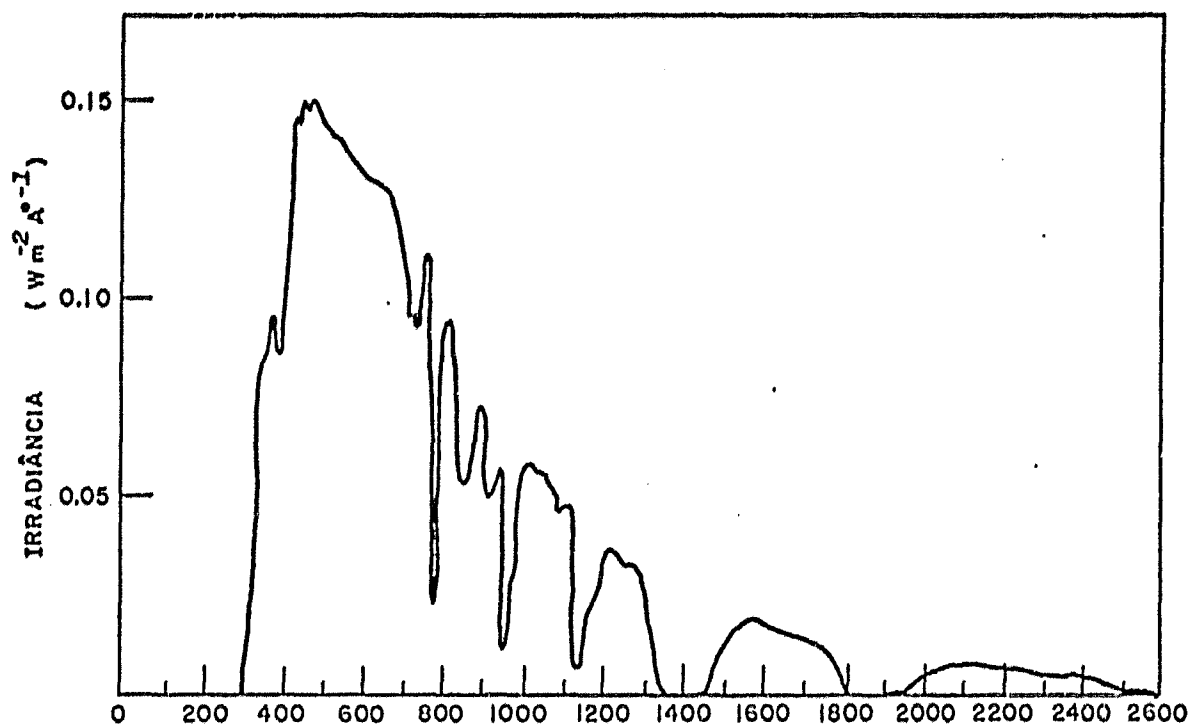


Fig. 2.8 - Curva da radiação solar ao nível do mar.

## 2.5 - PROPRIEDADES E MECANISMO DE REFLECTÂNCIA DE FOLHAS NO INFRAVERMELHO

Um espectro de reflectância típico de uma folha é mostrado a seguir na Figura 2.9.

Na região espectral do visível, a alta absorção da energia de radiação é devida aos pigmentos da folha, principalmente aos pigmentos de clorofila. Na faixa do infravermelho, a clorofila é completamente transparente a essa radiação. Na região além de 1200 nm, a forte absorção é devida à água.

A reflectância do infravermelho é causada pela estrutura interna da folha, não havendo absorção pela clorofila, nessa região, conforme mostra o gráfico da Figura 2.10, representado pela folha branca (albina) de gerânio, comparada com outra folha normal da mesma planta.

O alto nível de reflectância do visível da folha albina indica que a interação de energia com a estrutura da folha nesta região do espectro não é realmente diferente da interação da energia no infravermelho.

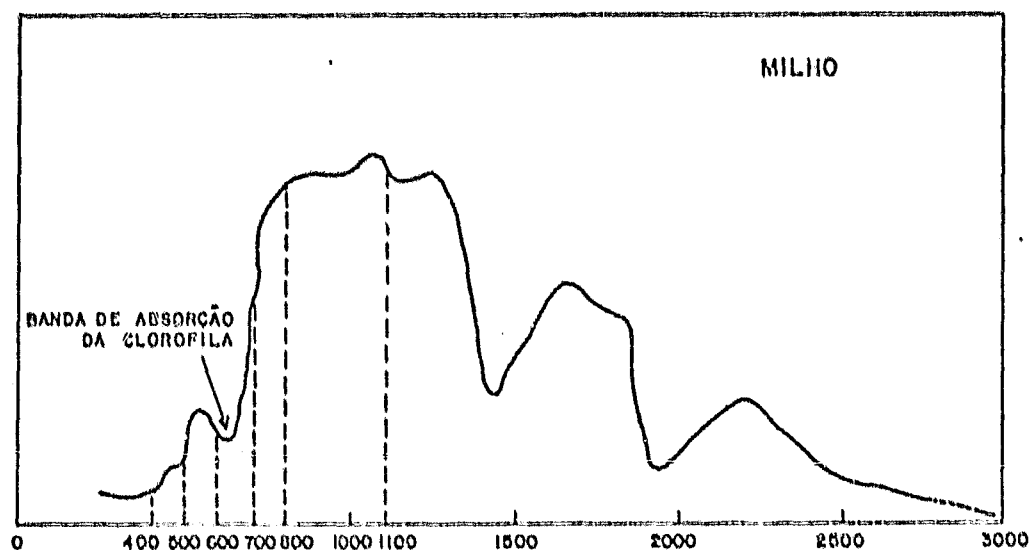


Fig. 2.9 - Espectro de reflectância de uma folha de milho.

FONTE: Harding e Scott (1978), p. 109.

Os fatos de a clorofila absorver a maioria da radiação visível e de a água absorver parte da radiação no infravermelho, é realmente uma forte evidência do mecanismo da reflectância interna e de que a radiação deve penetrar a folha, antes que ela possa ser absorvida. Tal evidência é dada pela redução drástica na reflectância da radiação no infravermelho, quando se infiltra água numa folha sob vácuo (Figura 2.11). A água preenche as cavidades de ar e forma um meio líquido de fase contínua através da folha. A eliminação das diferenças dos índices de refração, dentro da folha, aumenta a transparência direta às custas da dispersão múltipla.

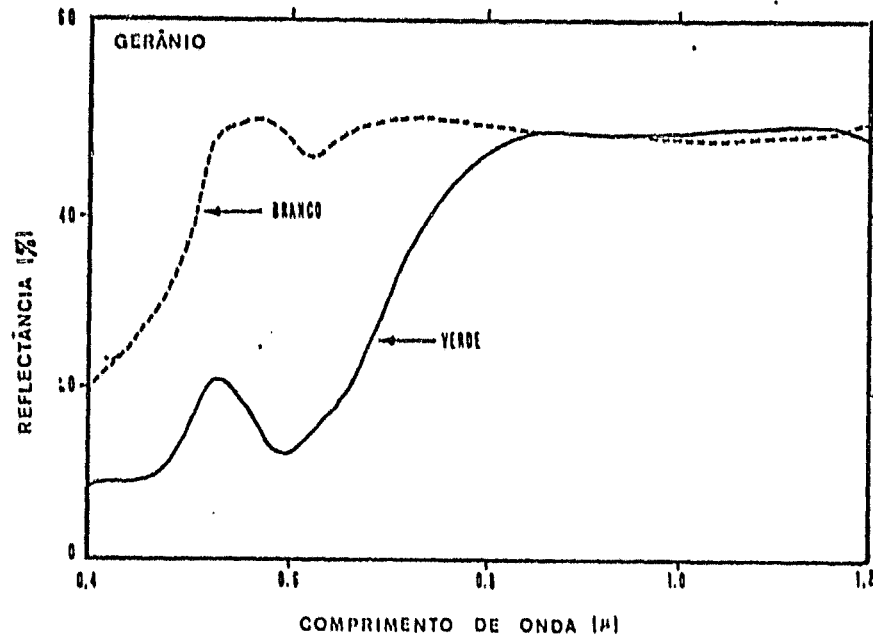


Fig. 2.10 - Espectro de reflectância de uma folha verde e uma albina de gerânio.

FONTE: Knipling (1970), p. 156.

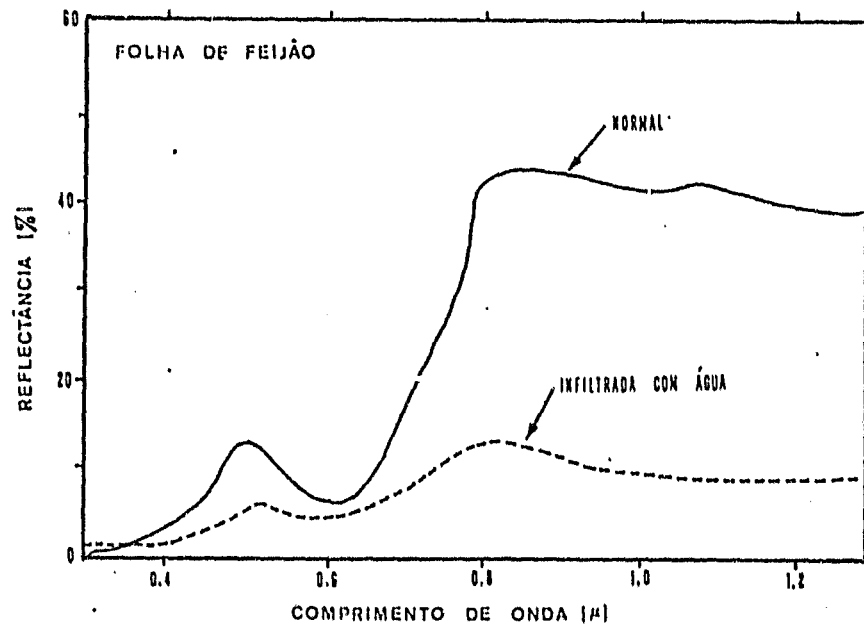


Fig. 2.11 - Espectro de reflectância de uma folha de feijão normal e infiltrada com água.

FONTE: Knipling (1970), p. 157.

A reflectância de folhas no infravermelho em desidratação muda muito pouco durante a murcha, mas aumenta com desidratação severa, especialmente nas bandas de absorção da água, conforme pode-se ver no gráfico da Figura 2.12.

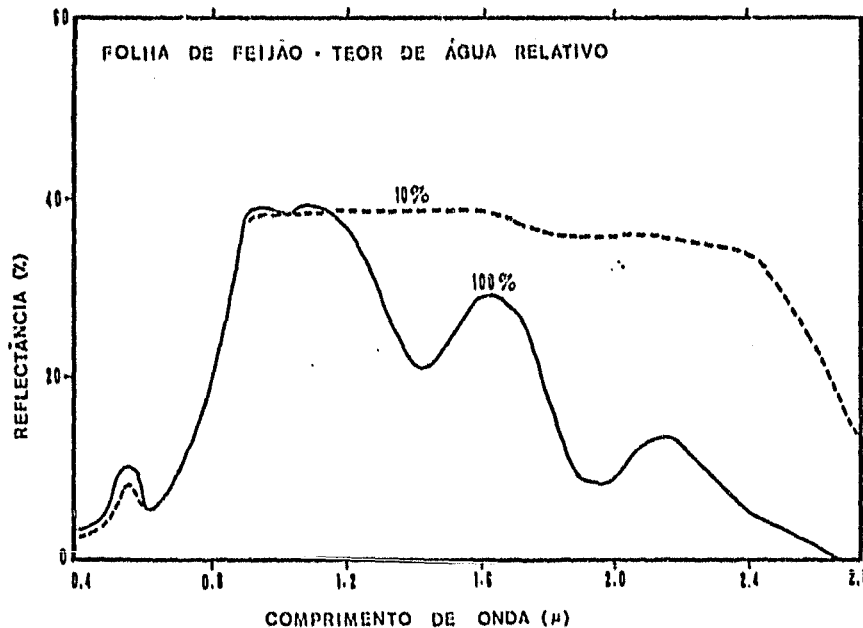


Fig. 2.12 - Espectro de reflectância de folhas de feijão com diferentes teores de umidade.

FONTE: Knipling (1970, p. 156).

As interfaces "*parede celular - cavidade de ar*" do meso-filo esponjoso parecem ser as principais superfícies de reflectância dentro da folha.

A murcha e o enrugamento das folhas que ocorrem durante o período de senescência, são acompanhados de uma desidratação, cuja consequência é a eliminação de alguma das interfaces refletivas da folha. Esse fato, conhecido como "*colapso do mesofilo*" é apontado como provável responsável dos casos de diminuição da reflectância da radiação infravermelha na folha.

## 2.6 - FATORES QUE AFETAM A REFLECTÂNCIA DA COBERTURA VEGETAL

A resposta espectral de uma folha isolada, obtida em laboratório, não é a mesma quando essa mesma folha compõe a cobertura vegetal de uma comunidade de plantas. Com efeito, a obtenção de resposta espectral de uma cultura no campo é influenciada por fatores endógenos e exógenos à cultura em estudo. Assim, por exemplo, os solos podem ser um dos fatores responsáveis pela variação da resposta espectral de culturas da mesma espécie, bem como o estágio de uma certa cultura determinar diferentes respostas espectrais, no decorrer do ciclo biológico dessa mesma cultura.

A reflectância de uma cobertura vegetal, segundo Knipling (1969) é inferior à reflectância de uma folha isolada, devido à atenuação da radiação, a variações no ângulo de iluminação, à orientação das folhas, a sombras e à influência de superfície de fundo.

De acordo ainda com Knipling (1969), enquanto os valores de reflectância de uma cobertura contínua de vegetação se situam por volta de 3 a 5% para o visível e de 35% para o infravermelho, no caso de uma folha individual, os valores de reflectância no visível e infravermelho são da ordem de 10% e 50%, respectivamente. Isto significa que os níveis de reflectância de uma cobertura vegetal no visível e infravermelho correspondem a 40% e 70%, respectivamente, dos níveis de uma folha isolada. O maior valor na reflectância do infravermelho é devido a um "fator de compensação", ou seja, grande parte da energia incidente do infravermelho é transmitida através das folhas superiores da copa, refletida pelas folhas mais baixas e retransmitida através das folhas superiores, aumentando deste modo a sua reflectância.

De um modo geral, os fatores que afetam a reflectância de uma cobertura vegetal de uma cultura agrícola são de natureza estrutural e geométrica. Assim, fatores como, tonalidade, tamanho, forma e orientação das plantas e de suas folhas, práticas culturais ou manejo e condições de crescimento ambiental influenciam as propriedades ópticas das folhas e da cobertura vegetal, e os padrões de reflectância recebidos pelos sen



sores aerotransportados nada mais são que a integração daqueles fatos.

## 2.7 - USO DE FILME INFRAVERMELHO PARA DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM CULTURAS

O princípio de detecção de anomalias em culturas agrícolas baseia-se na premissa de que sua reflectância é qualitativa e quantitativamente diferente daquela vegetação que se desenvolve saudável e vigorosamente.

Para estudos de detecção de anomalias, sejam elas causadas por doença ou estresse, podem ser utilizadas tanto fotografias de colorido normal como fotografias no infravermelho coloridas. Todavia, o uso de filme infravermelho é mais utilizado pelos pesquisadores em seus trabalhos. As razões dessa preferência fundamentam-se no seguinte:

### a) *Bases fisiológicas.*

A clorofila, como é sabido, é a principal substância responsável pela cor verde da folhagem, ou seja, reflete significativamente o verde e absorve, em grande parte, os comprimentos de onda do azul e do vermelho. Todavia, é altamente transparente ao infravermelho. Entretanto, os componentes celulares e tecidos internos das folhas refletem o infravermelho. Quanto à resposta de reflectância das folhas, sabe-se também que se manifestam prontamente na região do espectro visível, motivados pela sensibilidade da clorofila aos distúrbios metabólicos. Nessas condições de alteração metabólica, inicia-se um processo de deterioração pela diminuição da taxa de absorção de energia, no visível, aumentando, por conseguinte, a reflectância na região do visível. Isto, porém, afeta apenas a saturação da cor, não sendo facilmente perceptível aos nossos olhos. A grande vantagem do uso do infravermelho é de, nessas condições de alterações metabólicas da cultura, deslocar a tonalidade da cultura. Daí, então, dizer que a emulsão do filme infravermelho colorido tem a habilidade de discriminar mais claramente entre a folhagem e a superfície de fundo e amplificar as mudanças do balanço tonal do espectro visível.

b) *Bases físicas*

Um outro fator altamente resonsável pela distinção da vegetação sadia, utilizando-se filme infravermelho, está nas diferenças de densidade entre a folhagem e a área foliar. Estas diferenças podem ocorrer de uma perda direta da folhagem ou de uma paralização de cres cimento da planta. Concorrem com reduções da área foliar aumentos de sombra e superfícies não-foliares, tais como galhos e solo, que geral mente têm uma baixa reflectância. A energia refletida de tais áreas é normalmente diferente da vegetação sadia e de crescimento vigoroso tan to qualitativa com quantitativamente mesmo que as características de reflectância das folhas individuais possam não diferir grandemente. En tretanto, a reflectância total do infravermelho sobre a componente da folhagem da área sensoriada tende a ser muito mais reduzida que a re flectância do visível; isto porque as camadas de folhas são escassas e o efeito de realce do infravermelho é reduzido.

São estas, pois, as razões pelas quais o filme infraverme lho colorido tem grande aceitação e valor para estudos de detecção de anomalias em culturas.

2.7.1 - PROCESSO DE FORMAÇÃO DE IMAGEM EM FILME INFRAVERMELHO

Segundo Carvalho e Shimabukuro (1974), o processo de for mação de cor sobre o filme fotográfico está baseado em três fatos:

- 1) as cores percebidas pelo olho humano podem ser produzidas pela mistura de somente três cores, convenientemente escolhidas, de nominadas primárias;
- 2) emulsões fotográficas podem ser feitas para responder seletiva mente a cada uma dessas cores;

- 3) existem reações químicas que podem produzir três corantes individuais, cada um capaz de absorver essencialmente somente uma das cores primárias escolhidas.

A faixa de sensibilidade espectral de um filme infravermelho vai, aproximadamente, de 400 nm a 900 nm. O gráfico da Figura 2.13 mostra as curvas de sensibilidade da emulsão do filme Ektachrome Infrared Aero (EKIR) da Kodak.

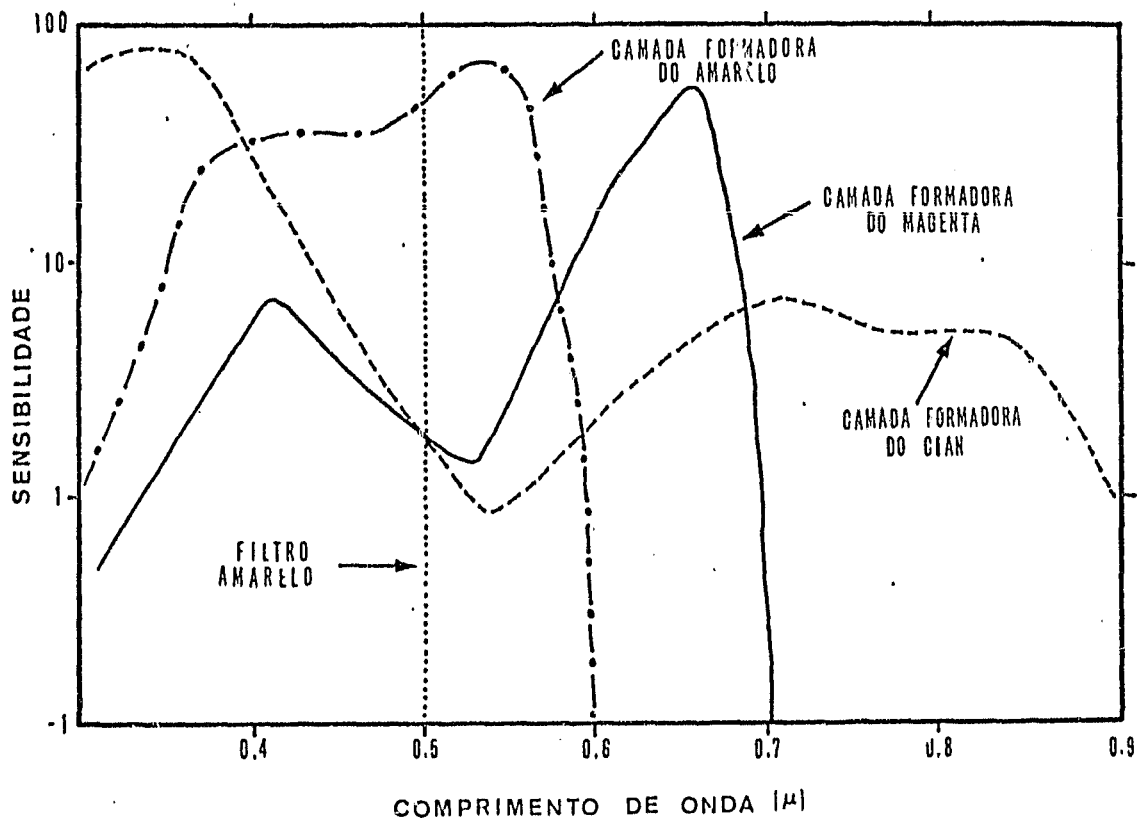
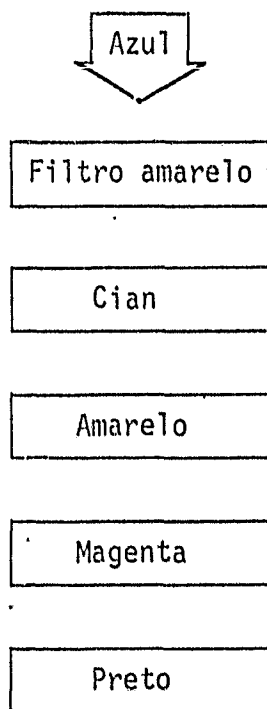


Fig. 2.13 - Curva de sensibilidade espectral do filme Ektachrome Infrared Aero (EKIR).

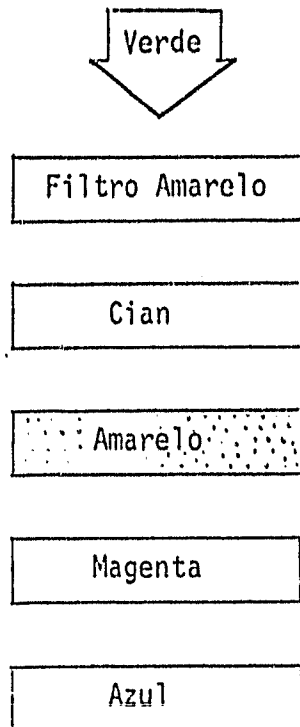
Como mostra o gráfico da figura acima, a camada formada do cian é sensível à radiação do infravermelho; a camada formadora do amarelo é sensível à radiação verde; e a camada formadora do magenta é sensível à radiação vermelha.

Durante o processo de desenvolvimento do filme, a cor de uma camada da emulsão não se forma, se a camada for exposta à radiação a qual ela é sensível.

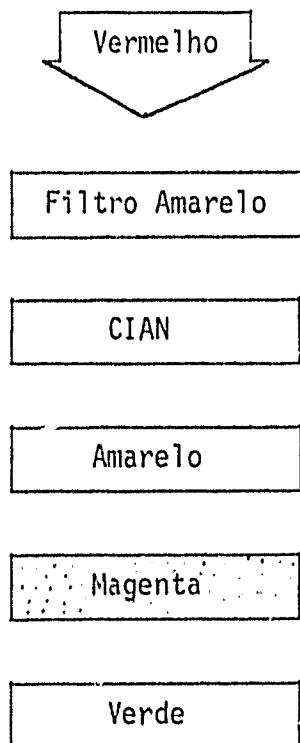
A seguir, é dado um esquema para explicação do processo de formação decor no filme aéreo infra vermelho colorido, onde a energia refletida por um objeto num determinado comprimento de onda do espectro visível e infravermelho, é representada por uma seta.



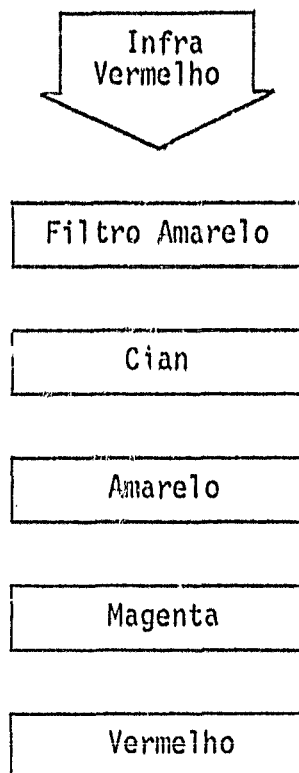
Objetos que refletem somente radiação azul não sensibilizam a emulsão, devido à presença do filtro amarelo, e os corantes se formam em todas as três camadas. Cada camada atua como uma transparência colorida discreta ou como filtro subtrativo, e quando todas as três são superpostas, a luz não pode ser transmitida. Então a imagem de objetos que reflete azul aparece preta.



Um objeto que reflete somente radiação verde, sensibiliza a camada formadora do amarelo, destruindo o corante desta cor, e os corantes das camadas que não foram sensibilizadas, cian e magenta, combinam-se para formar uma imagem azul quando vista pela luz transmitida.



A radiação vermelha refletida por um objeto sensibiliza a camada formadora do magenta, deixando praticamente intactos os corantes responsáveis pelas cores cian e amarelo, que, ao se combinarem durante o processamento fotográfico, vão formar uma imagem verde quando vista pela luz transmitida.



Um objeto que reflete somente energia infravermelha pode expor a camada cian, deixando as camadas amarela e magenta as quais combinam-se numa mistura subtrativa para formar uma imagem vermelha quando vista pela luz transmitida.

No caso de uma cultura (trigo, por exemplo), a sua energia, refletida e exposta ao filme, compõe-se de níveis relativamente altos de reflectância do infravermelho e de níveis variáveis de reflectância no visível. Nesse caso da cultura do trigo, dada a predominância de radiação do infravermelho, a camada cian é sensibilizada por essa radiação, deixando as camadas amarelo e magenta intatas. Assim, a cor da imagem é vermelha.

Supondo-se, agora, que o alvo seja solo nu (área preparada para cultivo), do tipo Terra Roxa, de coloração vermelha. Nesse caso, a radiação refletida que atinge o filme é a de comprimento de onda correspondente ao vermelho. A camada que agora será sensibilizada é a magenta, enquanto as camadas cian e amarela ficarão intatas. As cores cian e amarela combinar-se-ão durante o processamento fotográfico, formando uma imagem verde.

CAPÍTULO 3METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DE DADOS DO LANDSAT  
EM ÁREAS AGRÍCOLAS

O uso de dados do MSS do LANDSAT para trabalhos em agricultura tem potencialidade para as seguintes atividades:

- identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas;
- inventários agrícolas;
- mapeamento da distribuição espacial das culturas; e
- planejamento agrícola.

Para atender a esses objetivos, a análise e interpretação das imagens do MSS do LANDSAT deverão ser feitas através das características *espectrais, temporais e espaciais* das culturas em estudo.

Além da análise dessas 3 características, é muito importante observar 2 requisitos: um referente à imagem LANDSAT, ou seja, que elas estejam livres de cobertura de nuvens; e outro referente à cultura em estudo, isto é, que a extensão dos talhões da cultura seja compatível com a resolução geométrica do sistema LANDSAT (0,45 ha).

Para a análise espectral das culturas, podem ser utilizados os quatro canais do MSS, muito embora a utilização de apenas os canais 5 e 7 seja suficiente para a discriminação da cultura.

Embora o caráter espectral seja muito importante, o uso exclusivo dessa característica se torna, às vezes, insuficiente para se proceder à identificação de uma cultura numa determinada área. Todavia, a associação das características espectrais à variação temporal da cultura, em função de seu estágio de desenvolvimento, aliado ao conhecimento da sua distribuição no campo, se constitui num método altamente eficiente para a caracterização da cultura em imagens LANDSAT.

Associando-se esses atributos de análise das imagens para a caracterização das culturas com as características de rapidez e repetitividade do sistema LANDSAT, tem-se uma condição altamente favorável para o estabelecimento de um sistema de *previsão de safras*.

Um sistema de estimativa de produção requer o cálculo de dois parâmetros: *produtividade* (Kg/ha) e *área* (ha). Para o cálculo do primeiro parâmetro são utilizados dados climáticos, que podem ser coletados por satélites meteorológicos, e dados históricos de produção, os quais, através de um modelo matemático, permitirão a determinação do índice de produtividade de uma cultura, em uma determinada região. Para o cálculo da estimativa de área, podem ser utilizadas imagens LANDSAT.

Na Figura 3.1 é mostrado, esquematicamente, um sistema integrado para estimativa de produção, utilizando-se dados coletados por satélites meteorológicos e de recursos naturais (LANDSAT), com apoio de dados de campo, e tratados através de um sistema automático de dados digitalizados.

Um outro procedimento de utilização de imagens LANDSAT para identificação de alvos agrícolas é o de estratificar a região em estudo em zonas agrícolas homogêneas, de tal forma que os fatores ambientais e culturais não produzam efeitos drásticos no comportamento espectral das culturas.

As zonas agrícolas homogêneas, definidas segundo os critérios de densidade e tradição de plantio, tipo de solo, clima, topografia e outros fatores relacionados com a cultura, poderão ser plotados sobre as imagens LANDSAT. A partir dessas unidades ou estratos, far-se-á, então, a identificação da cultura, explorando as características espectrais, temporais e espaciais da cultura em estudo.



ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

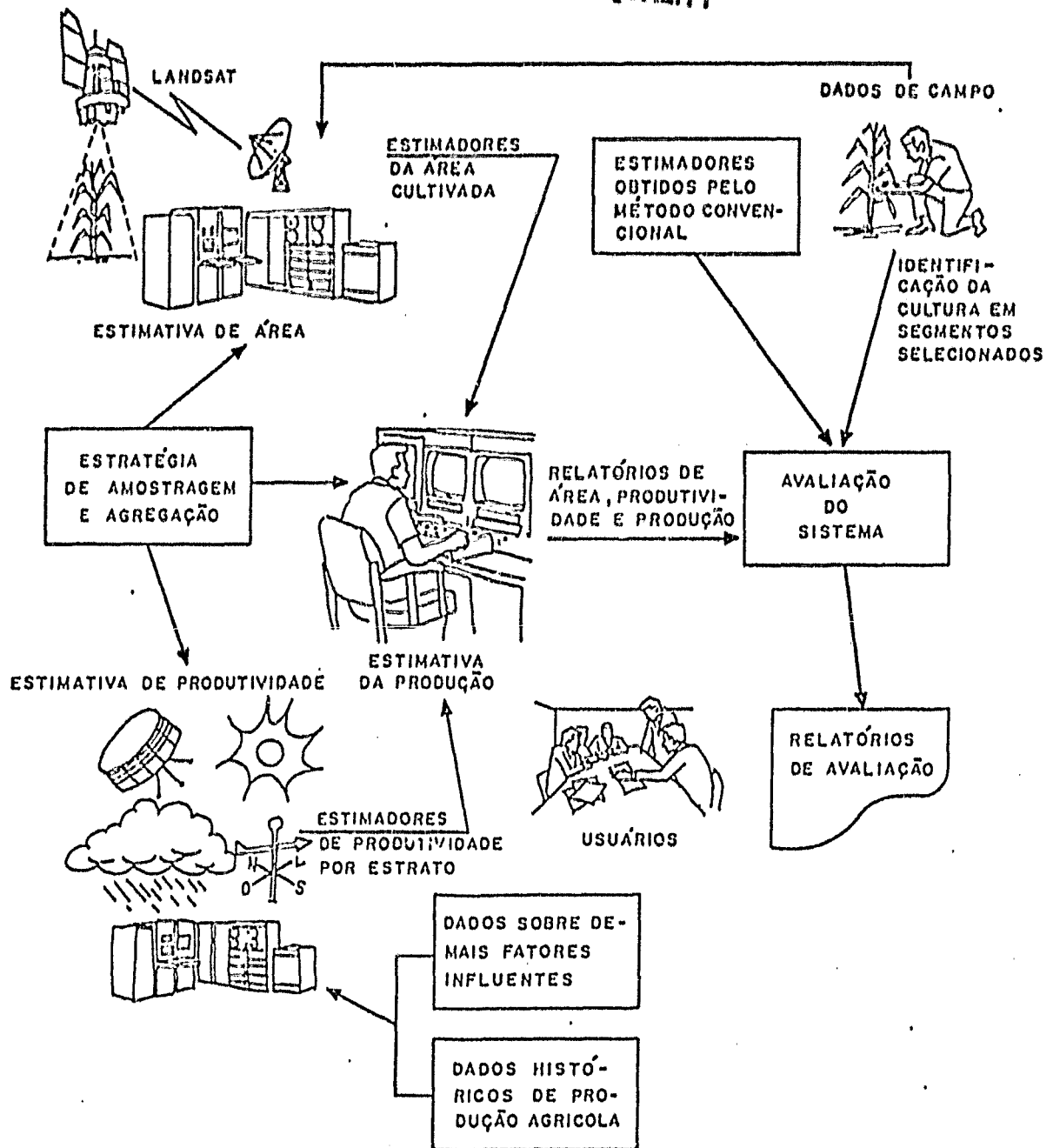


Fig. 3.1 - Diagrama esquemático da operação do sistema.

### 3.1 - METODOLOGIA DE TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Definida uma *área de estudo*, pode-se estabelecer uma metodologia para identificação e avaliação de áreas ocupadas com culturas, utilizando-se dados orbitais, de acordo com as seguintes fases:

Fase 1: Estudo dos *dados terrestres*, que consiste na aquisição de informações preliminares da região que ajudarão a conhecer os fatores ambientais e agronômicos que poderão influir no tipo de resposta espectral da cultura, e contribuirão para determinar critérios para uma estratificação em estratos homogêneos, dentro da área de estudo.

Fase 2: Estudo dos *dados suborbitais*, que compreende a aquisição de informações, a nível de aeronave, de áreas previamente selecionadas, dentro da área de estudo, denominadas áreas de treinamento, com o objetivo de auxiliar na Fase 3, durante o tratamento dos dados orbitais, para a classificação das culturas da área de estudo;

FASE 3: estudo dos *dados orbitais*, os quais podem ser tratados visual ou automaticamente.

A seguir, serão discutidas, detalhadamente, cada uma das três fases.

#### 3.1.1 - TRATAMENTO DOS DADOS TERRESTRES

A aquisição de informações preliminares sobre a região é muito importante, pois permite o levantamento de dois tipos de fatores: *ambientais*, tais como clima, tipos de solo e formas de relevo predominantes; e *agronômicos*, que compreendem o desenvolvimento de calendário cultural, práticas culturais, variedades plantadas, extensão dos talhões ocupados com as culturas e sua concentração e distribuição espacial dentro da região.

A consulta a trabalhos anteriormente realizados na região e a análise das informações acima descritas permitirão a elaboração de mapas esquemáticos e preliminares que ajudarão a traçar os exatos limites da área de estudo.

Definida a área de estudo e conhecidos os fatores ambientais e culturais que ocorrem dentro da região, verificam-se as órbitas do LANDSAT que cobrem a área de estudo.

Com relação à escolha da data mais propícia para a tomada dos dados, tanto suborbitais como orbitais, essa é função do estágio de desenvolvimento da cultura. Assim, no caso da cana-de-açúcar (Figura 3.2), as melhores épocas para a seleção das passagens mais adequadas do LANDSAT correspondem aos períodos do crescimento vegetativo e à colheita da cultura. Já para a cultura do trigo (Figura 3.3), a escolha da melhor época recai no período correspondente ao da frutificação.

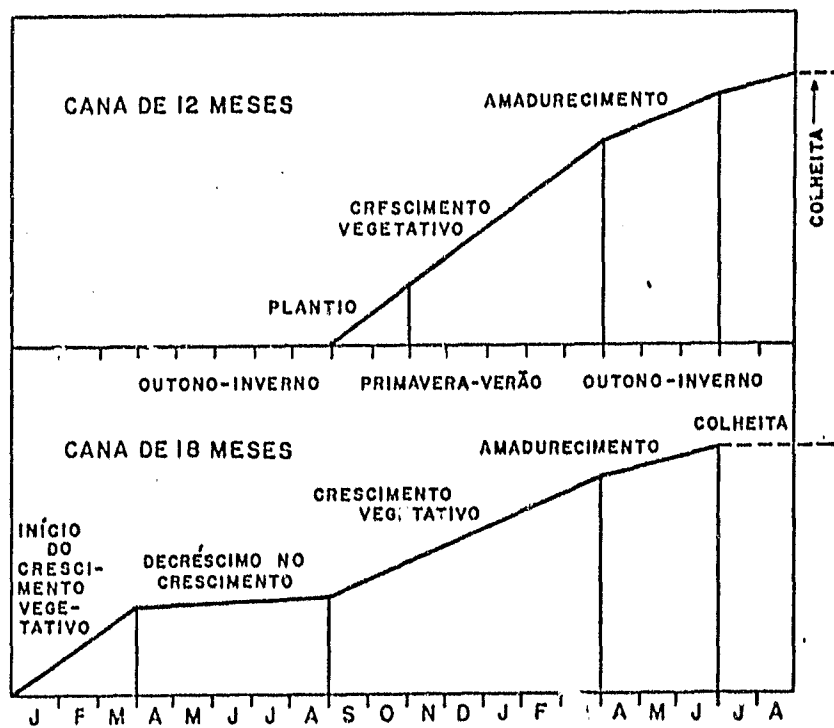


Fig. 3.2 - Ciclo cultural da cana-de-açúcar.

FONTE: Koffler et alii (1979), p. 7.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

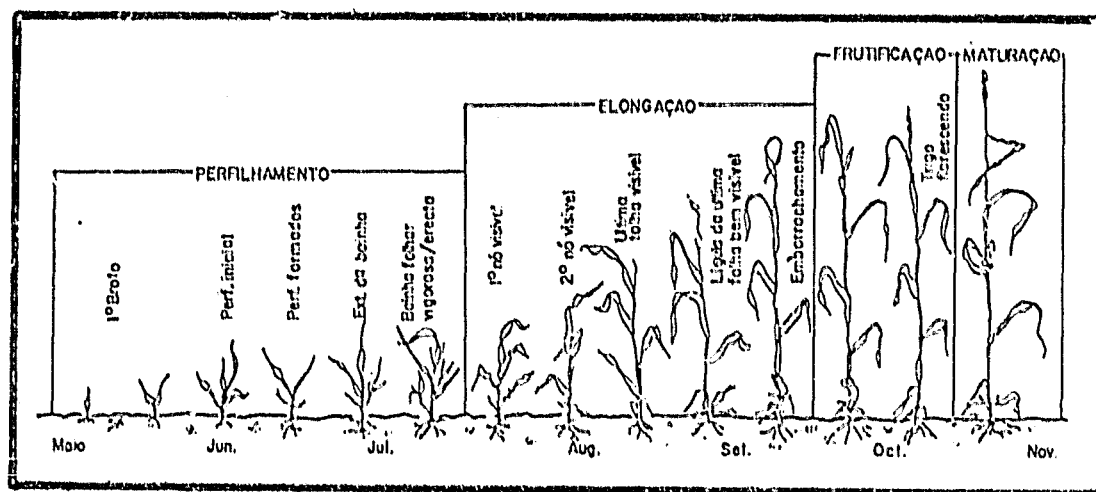


Fig. 3.3 - Ciclo cultural do trigo  
FONTE: Cotrisa (S.N.T), p.27

### 3.1.2 - TRATAMENTO DOS DADOS SUBORBITAIS

Como foi mencionado anteriormente, uma área de estudo não é toda homogênea. Fatores ambientais e agronômicos manifestam-se diferentemente, propiciando a ocorrência de diferentes padrões espaciais, seja entre várias culturas ou dentro de uma mesma cultura. Tal fato dificulta grandemente a análise dos dados orbitais.

Como é muito difícil verificar, em uma área de estudo, a ocorrência de todos os diferentes padrões espectrais de uma ou mais culturas, um método utilizado para estudar essas variáveis é o de definir, dentro da região de estudo, áreas a serem aerofotografadas, as quais são denominadas *áreas de treinamento*.

Tais áreas devem ser em número conveniente para cobrir, tanto quanto possível, o máximo de variações espectrais da cultura dentro da área de estudo. As informações obtidas na Fase-1 auxiliam muito na definição das áreas de treinamento (ver Figura 4.4).

Para a cobertura aerofotográfica das áreas de treinamento são definidas além do tamanho de cada área a ser sobrevoada, sua localização, o equipamento para a aquisição das fotografias aéreas, e os seguintes parâmetros: data de voo, tipo de filme, superposição longitudinal e lateral, e escala de voo.

Durante a realização do voo aerofotográfico, pode ser feito um trabalho de campo com o objetivo de levantar informações sobre o estágio da cultura aerofotografada, a ocorrência de outros alvos e informações que auxiliam na elaboração de uma chave de interpretação das fotografias aéreas, que estão sendo obtidas.

Após realizar o processamento do filme e plotar as fotografias aéreas em carta topográfica, numa escala conveniente, procede-se ao tratamento dos dados suborbitais coletados, na seguinte ordem:

- Determinação da escala média do voo aerofotográfico

A partir da carta topográfica, onde foram plotadas as fotografias aéreas, é possível determinar a escala média do voo aerofotográfico.

Para tanto, selecionam-se algumas fotografias de cada faixa de voo e identificam-se pares de pontos comuns tanto na fotografia aérea, quanto na carta topográfica. A seguir, mede-se a distância

cia linear entre esses pares de pontos, em cada um daqueles dois documentos cartográficos, através da seguinte relação:

$$\frac{dc}{1/EC} = \frac{df}{1/Ef}$$

onde:

dc = distância do par de pontos na carta topográfica

df = distância do par de pontos na foto aérea

Ec = escala da carta topográfica

Ef = escala da foto aérea.

Determina-se, então, a escala de cada foto pela seguinte expressão:

$$Ef = \frac{dc \times Ec}{df}$$

e a escala média do voo aerofotográfico é definida por:

$$E_{fm} = \frac{\sum_{i=1}^N Ef_i}{NF}$$

onde:

E<sub>fm</sub> = escala média do voo aerofotográfico

NF = número de pares de pontos medidos nas fotos aéreas

- Estabelecimento de uma chave de interpretação e legenda

Com base nos objetivos do trabalho, definidos anteriormente, e nas informações de campo, coletadas por ocasião do voo aerofotográfico, estabelece-se uma chave de interpretação das fotografias aéreas.

O objetivo da chave de interpretação não se restringe ao conhecimento dos elementos básicos interpretativos, como por exemplo, a tonalidade, a qual varia bastante de foto para foto e até mesmo na própria foto, mas ao estabelecimento de uma organização presente, numa imagem, de modo a ajudar o fotointérprete a fazer uma correta identificação de objetos desconhecidos. Enquanto os elementos básicos interpretativos são altamente variáveis, a organização estabelecida pela chave de interpretação não varia.

Colwell (Estes e Simonett, 1975) diz que uma chave de interpretação pode ser organizada para identificação de temas através do processo de seleção ou eliminação. No processo da chave de seleção, os fenômenos são ilustrados e descritos pelo fotointérprete, enquanto no processo da chave de eliminação, o analista estabelece, passo a passo, um método de identificação, através de uma série de identificações possíveis, eliminando, a seguir, todas aquelas consideradas como incorretas, segundo critérios estabelecidos.

Definidos os temas a serem identificados, estabelece-se, para cada um deles uma legenda.

#### - Fotointerpretação das fotografias aéreas

A interpretação das fotografias aéreas de um objeto é feita com base em sua forma, dimensão, tonalidade, textura, padrão, localização e formas associadas.

No caso de identificação de culturas, utilizando-se filme infravermelho colorido, o critério básico utilizado, é a cor, cujas características principais são: *tonalidade, saturação e brilho*.

A *tonalidade* é determinada pela frequência da energia luminosa no espectro eletromagnético. Assim sendo, quando se fala em tonalidade vermelha diferente de tonalidade verde, isto quer dizer que a primeira corresponde ao intervalo do comprimento de onda que vai aproximadamente de 610 - 780 nm, enquanto a segunda está compreendida no intervalo entre 500 - 570 nm. Naturalmente existem famílias de tonalidades, como, por exemplo, muitas tonalidades de vermelho, azul e verde, possuindo cada uma seu comprimento de onda individual ou faixas de comprimento de onda. Desse modo, as cores magenta, amarela, etc. são consideradas também como tonalidades.

A *saturação* de uma cor é, por sua vez, a medida de sua diluição em uma luz branca. Uma cor que estiver completamente saturada é uma cor monocromática pura, ou seja, sem nenhuma tintura da cor ou graduação da tonalidade.

O *brilho* de uma cor é a medida da quantidade de luz refletida pela referida cor sobre o olho humano, sendo, portanto, uma medida da claridade ou da obscuridade de uma cor.

A Figura 3.4 mostra um exemplo de fotografia infravermelha colorida. Ali, as culturas de trigo (T) e cevada (C) são caracterizadas pelos seus diferentes padrões de tonalidade. Enquanto o trigo apresenta uma tonalidade magenta escura, a cevada se caracteriza pela tonalidade róseo-clara. O solo preparado para cultivo (SP) apresenta um verde intenso e homogêneo, diferindo, portanto, das áreas de pouso (PS), pois estes possuem um padrão de tonalidade verde, mas com um tom de magenta.

A *textura* é um outro critério que auxilia a identificação dos temas agrícolas em fotografias aéreas coloridas no infravermelho. Ainda na Figura 3.4, pode-se ver que, enquanto as culturas (trigo e cevada) apresentam uma textura lisa e homogênea, as áreas ocupadas com vegetação arbórea (M) apresentam-se com uma textura caracteristicamente grosseira e não uniforme.



A pastagem (P), na Figura 3.4 é diferenciada das áreas ocupadas com culturas por apresentar tonalidade e textura fotográficas, totalmente não uniformes.



Fig. 3.4 - Fotografia colorida no infravermelho, que mostra padrões fotográficos dos temas trigo (T), cevada (C), pousio (PS), solo preparado para cultivo (SP) e vegetação arbórea (M):

Após a aplicação dos critérios de fotointerpretação, restarão situações duvidosas. Para solucionar este problema, selecionam-se aquelas fotos com interpretação duvidosa e faz-se uma verificação de campo, a fim de se proceder às devidas correções.

Feitas a interpretação dos temas e as devidas correções, através da verificação de campo, elaboram-se os mapas temáticos das áreas de treinamento.

#### - Avaliação de área

O cálculo da área dos temas identificados pode ser feito através de malha de pontos equidistantes, colocada sobre o mapa temático obtido. Para mapas na escala de 1:20.000, a malha poderá ser formada de pontos equidistantes de 0,5 cm. Neste caso, cada ponto equivale a 1 ha, que multiplicado pelo número de pontos contados, dá a área do tema em hectare. Em termos gerais, a relação do valor da área, utilizando-se malha de pontos é a seguinte:

$$A = N \times f$$

onde:

A = área do tema

N = número de pontos contados

f = fator a ser multiplicado pelo número de pontos contados, o qual é função da escala de trabalho.

#### 3.1.3 - TRATAMENTO DOS DADOS ORBITAIS

A área correspondente de uma imagem MSS do LANDSAT é de 3.429.904 ha. Para ter uma idéia da amplitude dessa área, na Tabela 3.1 está calculado o número de fotos aéreas que cobrem uma imagem MSS do LANDSAT.

O número de informações de uma imagem MSS é muito grande. Daí a abordagem de interpretação dessas imagens, através de uma sistemática denominada "*multi-estágio*", conforme esquematiza a Figura 3.5.

TABELA 3.1

NÚMERO DE FOTOS AÉREAS QUE COBREM UMA IMAGEM MSS DO LANDSAT, ADMITINDO  
FAIXAS LATERAIS COM 30% DE SUPERPOSIÇÃO LATERAL

| ESCALA    | SUPERPOSIÇÃO LONGITUDINAL |        |        |
|-----------|---------------------------|--------|--------|
|           | 30%                       | 50%    | 60%    |
| 1.10.000  | 13.225                    | 18.515 | 23.230 |
| 1.20.000  | 3.364                     | 4.698  | 5.858  |
| 1.25.000  | 2.116                     | 2.990  | 3.726  |
| 1.30.000  | 1.521                     | 2.106  | 2.652  |
| 1.40.000  | 841                       | 1.189  | 1.479  |
| 1.60.000  | 400                       | 540    | 680    |
| 1.100.000 | 144                       | 204    | 252    |
| 1.120.000 | 100                       | 140    | 170    |

As fases 1 e 2, anteriormente descritas, podem ser consideradas como estágios que auxiliarão a interpretação das imagens orbitais. A fase 3 é o último estágio e refere-se ao tratamento propriamente dito dos dados orbitais, cujos métodos de tratamento podem ser *visual* ou *automático*, descritos a seguir.

- *Método de análise visual*

Para trabalhos de identificação de culturas em imagens LANDSAT, empregando-se o método de análise visual, os critérios básicos para essa análise são as características espectrais da cultura (canais 5 e 7) e sua variação temporal.

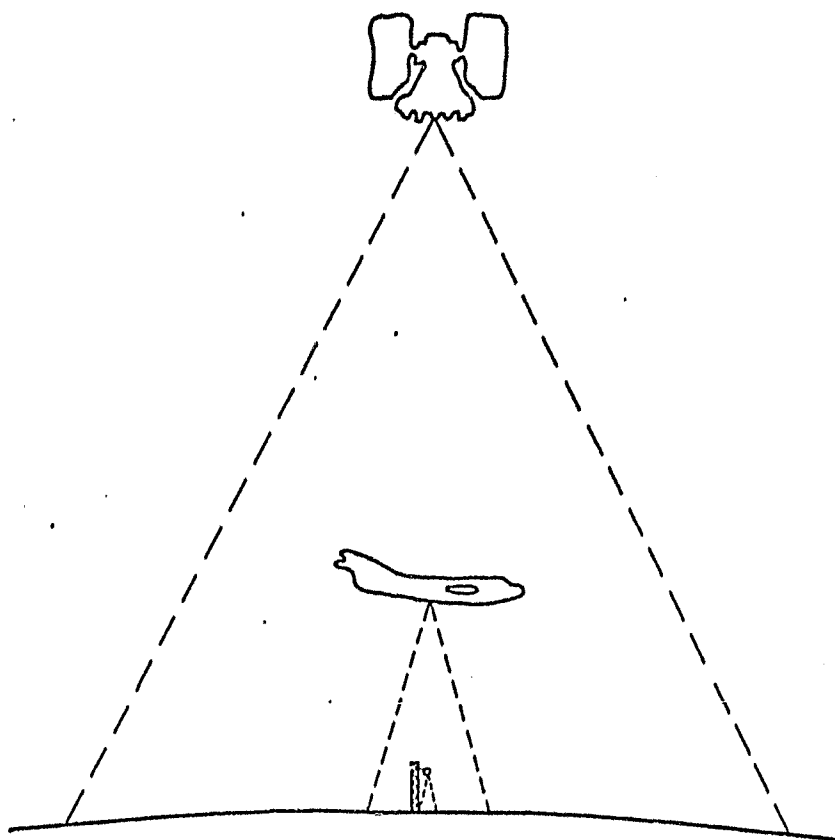


Fig. 3.5 - Conceito de Levantamentos em "Multiestágios".

No caso da análise temporal, para melhor entender a importância dessa característica, suponha que a cultura A, que se pretende identificar, tenha sua resposta espectral muito semelhante à da cultura B. Nesse caso, uma alternativa favorável à discriminação dessas duas culturas seria escolher uma data, de tal sorte que o período de maior vigor vegetativo da cultura A (que corresponde à fase em que a cultura responde mais intensamente à energia solar) coincida com o período de menor vigor vegetativo da cultura B e, conseqüentemente, de menor resposta espectral. O gráfico da Figura 3.6 mostra essa situação. A área hachurada, corresponde à época em que a cultura "A" tem sua resposta espectral mais forte que a da cultura B sendo neste caso, a época de melhor identificação na imagem LANDSAT para a cultura A.

ORIGINAL PAGE  
COLOR PHOTOGRAPH

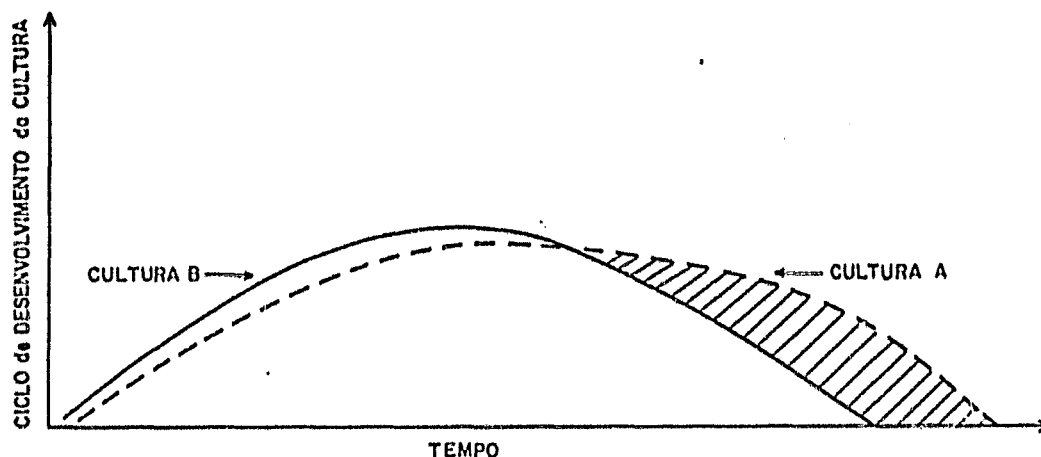


Fig. 3.6 - Representação esquemática do ciclo de desenvolvimento de duas culturas.

Um exemplo da utilização desses dois critérios pode ser esquematizado, tomando-se a cana-de-açúcar como alvo a ser identificado e utilizando-se imagens LANDSAT, nos canais 5 (600 a 700 nm) e 7 (800 a 1100 nm) de duas épocas distintas, seguidas de uma chave de interpretação, mostrada na Figura 3.7.

| PERÍODO         | PRIMEIRO PERÍODO |              |                      | SEGUNDO PERÍODO |             |              | TERCEIRO PERÍODO |              |             |
|-----------------|------------------|--------------|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
| CARACTERÍSTICAS | Espectral        |              |                      | Temporal        |             |              | Espectral        |              |             |
| CANAL           | 5                | 7            | 7                    | 7               | 7           | 7            | 7                | 5            | 5           |
| TONALIDADE      | CINZA ESCURO     | CINZA ESCURO | CINZA MÉDIO OU CLARO | CINZA CLARO     | CINZA CLARO | CINZA ESCURO | CINZA MÉDIO      | CINZA CLARO  | CINZA MÉDIO |
| LEGENDA         |                  |              |                      |                 |             |              |                  |              |             |
| TEMA            | ?                | CORPO D'ÁGUA | VEGETAÇÃO ARBÓREA    | CANA ?          | Cana        | Cana CORTADA | CANA ?           | Cana CORTADA | OUTRO       |
| OBS.            |                  |              |                      |                 |             | SOLO ESCURO  | SOLO CLARO       |              |             |

Fig. 3.7 - Chave de interpretação de cana-de-açúcar, utilizando-se imagens LANDSAT, segundo suas variações espectral e temporal.

No exemplo da cana-de-açúcar, supondo-se que a data do primeiro período para identificação dessa cultura seja o mês de abril, e que no segundo período se utilize imagens LANDSAT de julho, os passos para a interpretação visual das imagens são os seguintes:

- Passo 1: delimitam-se, no canal 5 (imagem de abril), todas as áreas de tonalidade *cinza-escuro*. A seguir, superpõe-se o canal 5 ao canal 7. Todas as áreas de tonalidade *cinza-escuro*, delimitadas no canal 5, que apresentarem no canal 7 idêntica tonalidade *cinza-escuro* são identificadas como *corpos d'água*. Aquelas áreas de tonalidade *cinza-escuro*, do canal 5, que não apresentarem esta tonalidade no canal 7, mas apresentam uma tonalidade *cinza médio* ou *claro*, são identificados como *vegetação arbórea* (vegetação natural, reflorestamento ou pomar). As áreas restantes de tonalidade *cinza-claro* desse canal 7 são delimitadas, para posterior análise comparativa com imagem de outra data. Nessa primeira fase, através desse processo de eliminação, exclui-se o alvo vegetação arbórea, o qual é altamente competitivo, do ponto de vista espectral, com a cana-de-açúcar. Com esse procedimento, minimizam-se os erros de confusão de interpretação dos dois alvos;
- Passo 2: superpõe-se o canal 7 da imagem de abril ao canal 7 da imagem de julho. As áreas de tonalidade *cinza-claro* do canal 7 da imagem de julho, que coincidirem com as áreas, -delimitadas anteriormente - de tonalidade *cinza-claro* do canal 7 da imagem de abril, são interpretadas como cana-de-açúcar. Aquelas áreas de tonalidade *cinza-claro* da imagem de abril que coincidirem com áreas de tonalidade *cinza-escuro* da imagem de julho, no caso de solos de coloração escura (Latosolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro, Terra Roxa, etc.) são identificados como áreas de *cana cortada*. Na hipótese de que o subs

trato seja solos de coloração clara (Latossolo Amarelo, Regossolo, Areias Quartzosas, etc), se as áreas de tonalidade *cinza-claro*, delimitadas anteriormente no canal 7 da imagem de abril, se apresentam no canal 7 da imagem de julho com tonalidade *cinza-médio* serão inicialmente marcadas. A seguir, comparam-se os canais 7 e 5 da imagem de julho. Aquelas áreas que, no canal 7, apresentam um padrão de tonalidade *cinza-claro* e, no canal 5, um padrão de tonalidade *cinza-claro* serão identificadas como *cana cortada*. E aquelas que, nesse mesmo canal, apresentarem um padrão de tonalidade *cinza-médio* serão rejeitadas, ou seja, serão consideradas como áreas de não cana.

- Método de Análise Automática

Num sistema de tratamento de dados digitalizados podem-se seguir dois processos, baseados nos seguintes tipos de classificação:

- 1) Classificação não supervisionada - quando o sistema, através de um programa, varre os dados digitalizados para encontrar grupos espectrais bem distintos;
- 2) Classificação supervisionada - nesse caso, o analista fornece informações prévias ao sistema de análise automática, por meio de áreas de treinamento, para que a classificação possa ser realizada e, posteriormente avaliada.

O Sistema Interativo de Análise de Imagem Multiespectral (IMAGE-100 ou, simplesmente, I-100), cuja configuração está mostrada na Figura 3.8, está baseado principalmente neste segundo tipo de classificação. Ele é um sistema especialmente desenvolvido para tratar, analisar e classificar dados com processamento digital, especialmente os do MSS do LANDSAT (General Electric Company, 1975).

O IMAGE-100 utiliza uma linguagem de máquina especial ("hardware"), que opera sob controle de um minicomputador, para a implementação dos algoritmos de extração. Provisões interativas permitem ao usuário controlar e/ou modificar o processo de análise, baseando-se no seu conhecimento da imagem que serve como entrada para o sistema.

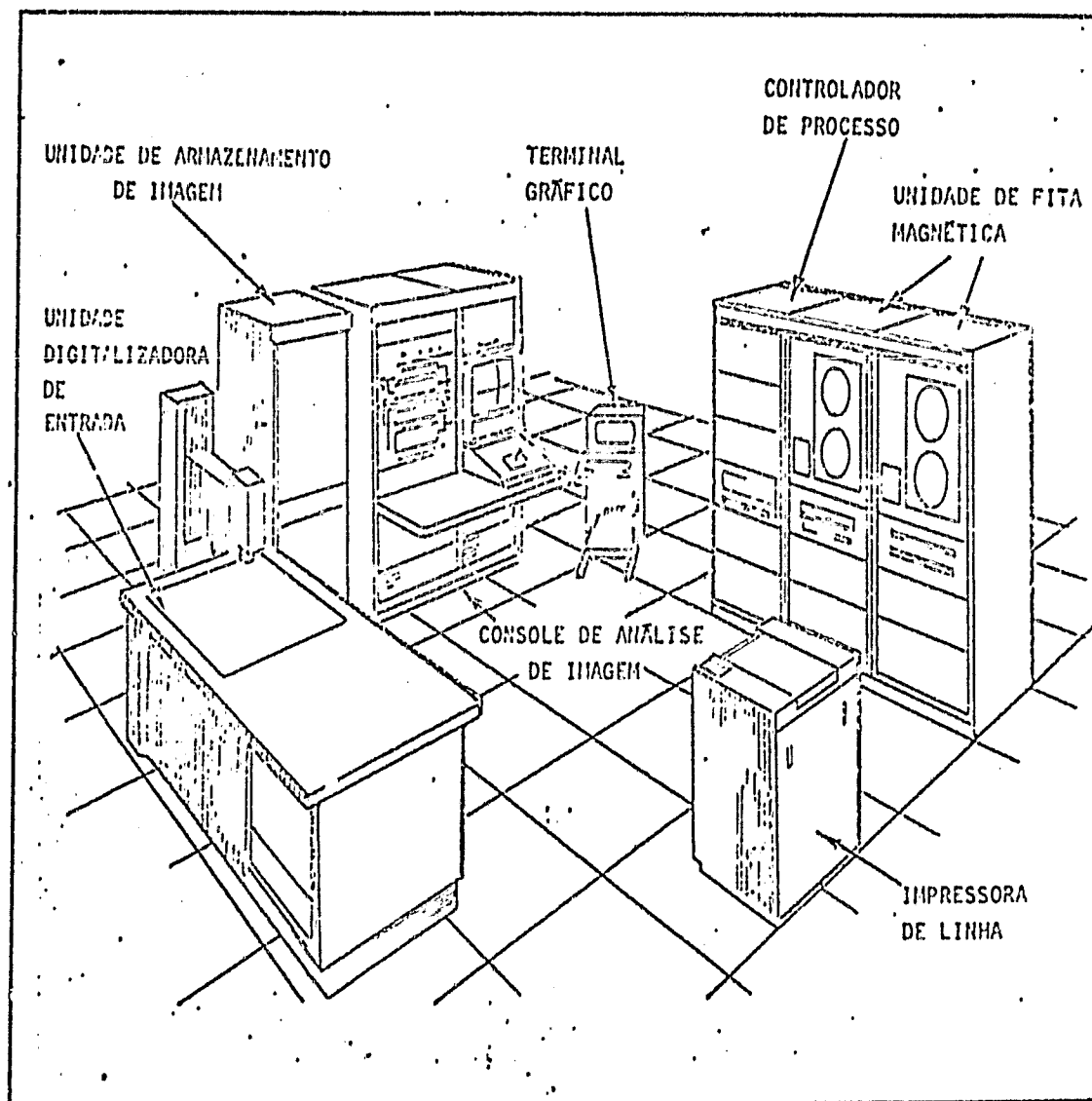


Fig. 3.8 - Configuração do IMAGE-100, mostrando os seus componentes.



De acordo com Cavalcanti (1975), as duas principais funções de análise realizadas na operação desse sistema são:

- a) Treinamento: a análise multiespectral tem como base o fato de objetos parecidos em uma mesma cena terem propriedades espectrais diferentes. Para efetuar a análise, o analista deve informar ao sistema quais os objetos ou características (água, solo, vegetação, etc.) são de interesse. O processo que informa ao sistema qual o objeto a analisar e identificar as propriedades espectrais deste objeto denomina-se *treinamento*.
- b) Classificação: quando as propriedades espectrais do objeto são encontradas, o IMAGE-100 varre a imagem toda (ponto a ponto) e determina as propriedades espectrais de cada ponto, correlacionando-as com aquelas do objeto de interesse. Este processo de teste é chamado *classificação*. O resultado deste processo é um mapa, no qual cada ponto da imagem é identificado por um tema, em vez de, por um nível de cinza.

O procedimento para a classificação de uma determinada cultura agrícola, através do sistema I-100, pode, de um modo geral, ser assim esquematizado:

- 1) lê-se, a fita CCT (Computer Compatible Tape) referente à área de interesse, cuja cena é mostrada no vídeo de uma televisão do I-100;
- 2) delimita-se a área de interesse e, a seguir, armazena-se, em disco magnético, a cena da área de interesse nas quatro bandas ou canais;
- 3) selecionam-se as amostras de treinamento a partir de áreas previamente conhecidas (áreas de verdade terrestre), que servirão de suporte para a classificação de toda a área de estudo. Para a aquisição de áreas de verdade terrestre podem ser utilizadas

fotografias aéreas coloridas, onde os diferentes padrões fotográficos dessas fotografias aéreas, referentes a uma cultura, são associados à área correspondente na imagem LANDSAT e utilizada como treinamento pelo computador;

- 4) faz-se, então, a classificação automática de toda a área de estudo, a partir das amostras de treinamento, utilizando-se algoritmos matemático-estatísticos.

A grande maioria dos sistemas existentes para processamento de dados multiespectrais utiliza a técnica de distribuição gaussiana, com base na observação de alguns dados que exibem propriedades muito aproximadas da estatística normal multivariada.

A característica de distribuição gaussiana de dados multiespectrais, observada em algumas culturas, permite que se utilize a regra de máxima verossimilhança para a classificação de culturas, de modo a minimizar o problema de respostas espectrais superpostas (Figura 3.9).

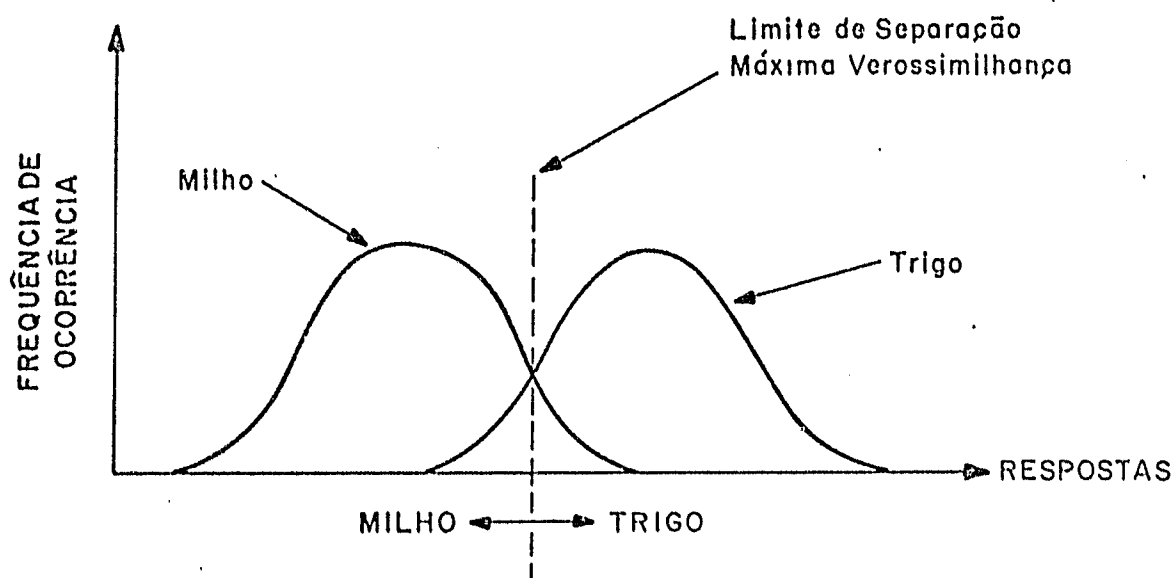


Fig. 3.9 - Ilustração da "máxima verossimilhança".

De acordo com Velasco et alii (1978), os fundamentos teóricos do algoritmo de classificação de padrões, que utiliza a *regra de decisão de máxima verossimilhança* "é o de, dadas várias classes e um objeto suposto pertencer a uma das classes, determinar a qual classe o objeto pertence". Isto significa, no caso da utilização de imagens LANDSAT para identificação de culturas, que as *classes* dadas são culturas agrícolas que se pretende identificar, e o *objeto* é um ponto (elemento de resolução ou pixel) da imagem. Assim sendo, deseja-se saber qual a cultura plantada naquele ponto.

Um método usado para resolver este problema, segundo Velasco et alii (1978), é o de determinar diversas características ou atributos quantificáveis dos pontos da imagem, tais como faixas ou intervalos espectrais, que possam diferenciar as diferentes classes (tipos de culturas agrícolas). O passo seguinte consiste em tomar pontos da imagem, que se sabe pertencer a um determinado tipo de cultura, e medí-los nas diversas bandas ou canais da imagem LANDSAT. A partir destas medidas inferem-se as características espectrais de cada tipo de cultura agrícola. A classificação é feita comparando-se, nos diferentes intervalos espectrais ou canais da imagem LANDSAT, cada valor de nível de cinza do ponto da imagem a ser classificado com o valor que caracteriza a resposta espectral do tipo de cultura agrícola.

A formulação estatística do algoritmo de classificação pode ser assim resumida:

As técnicas estatísticas de reconhecimento de padrões sempre fazem uso das funções de densidade de probabilidade associadas com as classes. Sejam, então, as classes caracterizadas pelas funções de densidade de probabilidade condicional:

$$p(x | \omega_i) \quad i = 1, 2 \dots$$

A função  $p(x | w_i)$  dá a probabilidade de ocorrência do padrão  $x$ , dado que  $x$  é de fato da classe  $w_i$ . Uma hipótese importante formulada para esses algoritmos de classificação é que  $p(x | w_i)$  tem distribuição gaussiana. Dentro dessa hipótese, a *matriz de covariância* e o *vetor media* são suficientes para caracterizar a distribuição de probabilidade de qualquer classe padrão.

Obtida a classificação automática, é possível obter, através do sistema I-100, um mapa temático da cultura classificada. Esse mapa pode ser gerado de dois modos: através da impressora do sistema IMAGE-100 (mapa alfanumérico), ou através da unidade denominada DICOMED (Digital Color Image Recorder), na forma fotográfica. A Figura 3.10, mostra um mapa temático de cana-de-açúcar, gerado a partir de fotografia aérea, que serviu de suporte para a classificação automática, cujos mapas temáticos são mostrados nas Figuras 3.11 (mapa em forma fotográfica) e 3.12 (mapa alfanumérico).

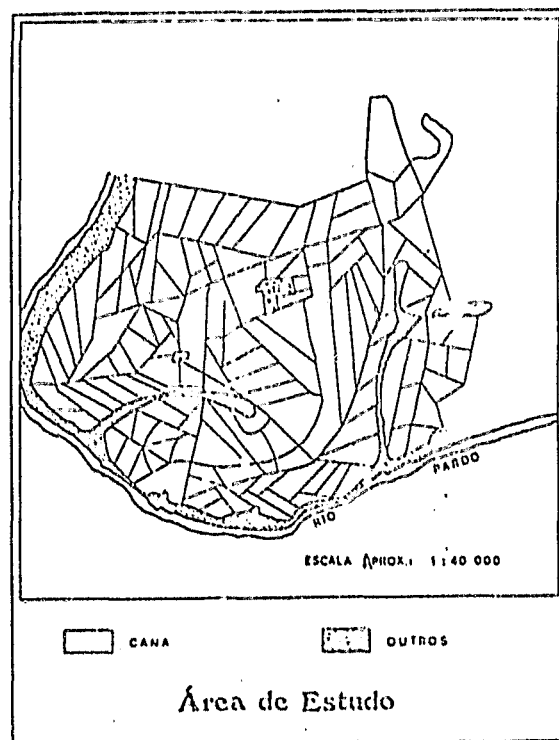


Fig. 3.10 - Identificação de cana-de-açúcar através de fotografias aéreas.

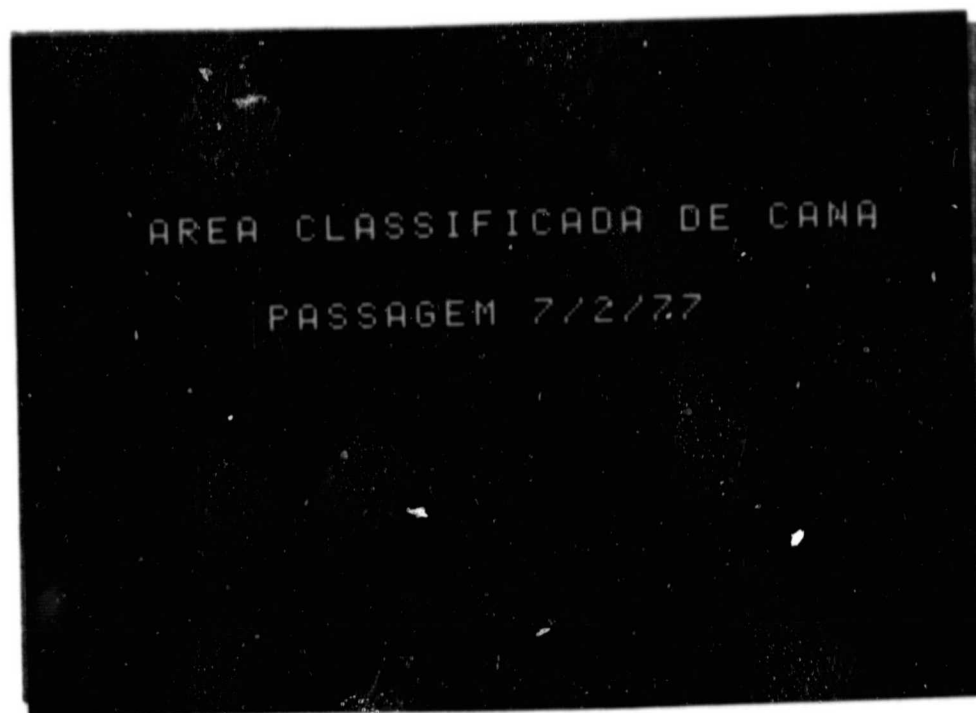


Fig. 3.11 - Saída de classificação automática de cana através do subsistema DICOMED.

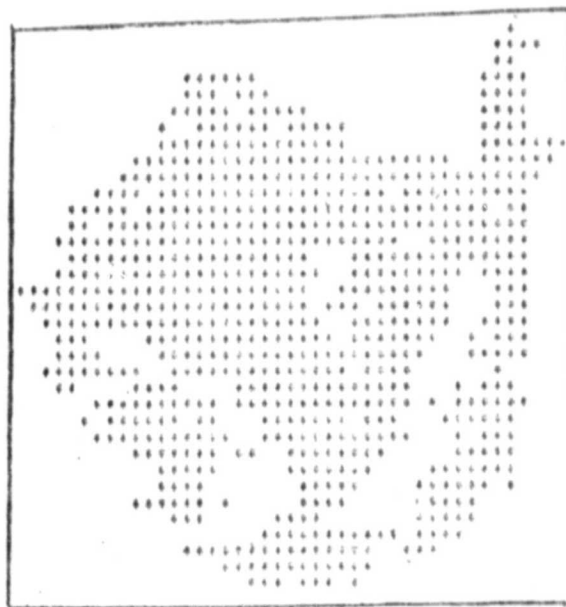


Fig. 3.12 - Saída de classificação automática de cana através do subsistema IMPRESSORA.

### 3.1.3.1 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DE IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS DO LANDSAT

Conforme sejam tratados os dados do LANDSAT, *visual* ou *automaticamente*, o procedimento para determinar a precisão de identificação varia. Desse modo, serão apresentados dois métodos de avaliação de precisão de identificação: um para o caso em que se usa a análise *visual* dos dados do LANDSAT, e outro quando esses dados são tratados *automaticamente*.

#### a) Avaliação da precisão de identificação dos dados tratados *visualmente*

Para determinar a precisão da análise visual em imagens LANDSAT, considera-se a área mapeada (Figura 3.13) como uma população de infinitos pontos. Cada ponto tem seu padrão espectral característico e se refere a um alvo específico, sendo que pode ou não haver erros de interpretação quanto a esses pontos. O que se deseja saber é a probabilidade de interpretação correta de tais pontos (P) no mapa, uma vez que o valor de P somente pode ser obtido através de uma enumeração completa desses pontos. Como isto é impraticável, pois implica alto custo e consome muito tempo, um procedimento que pode ser adotado é o da *amostragem estatística aleatória*, onde se pode estimar o valor de P.

Para a aplicação desse método superpõe-se, inicialmente, uma grade com um sistema de coordenadas espaciais aleatório ao mapa da área interpretada. A seguir, através de uma escolha aleatória, seleciona-se o número de amostras, anteriormente determinado por métodos estatísticos para serem verificados no campo de acordo com as características da área de estudo. Baseando-se na informação de campo, a precisão da interpretação pode ser quantificada, isto é, dá-se o valor 1 aos pontos interpretados corretamente, e o valor 0 para os interpretados incorretamente. Finalmente, faz-se a análise estatística dos dados e determina-se a precisão de interpretação (Chen, 1980).

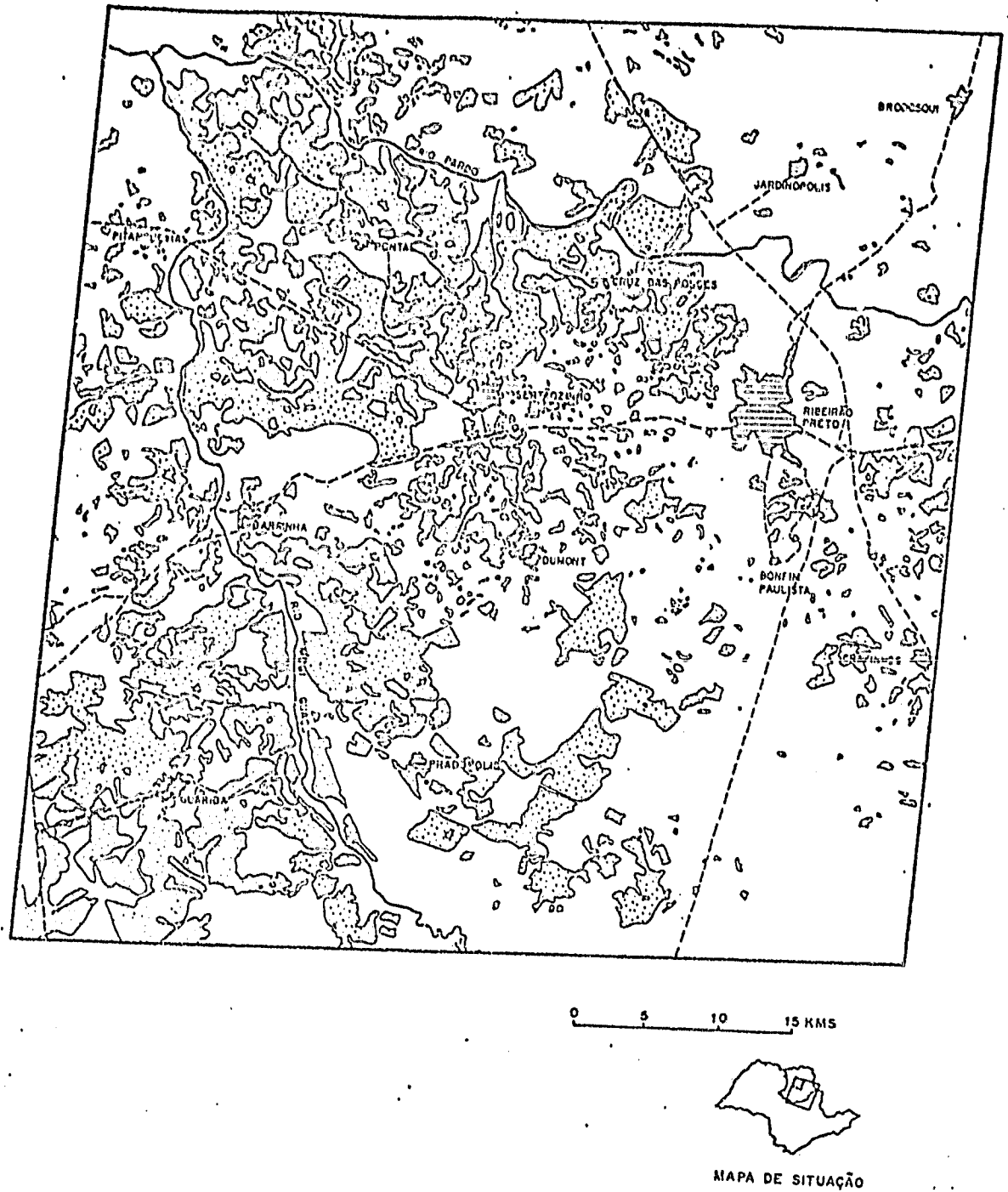


Fig. 3.13 - Área mapeada com cana-de-açúcar através de imagens LANDSAT tratadas visualmente.

Para estimar o valor de  $P$  (probabilidade ou proporção de pontos identificados corretamente), através da amostra de  $n$  pontos coletados, a média da amostra é assim obtida:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.1)$$

onde:

$X$  : é uma variável dicotômica (1 ou 0)

$n$  : é o número de amostras; e

$\bar{X}$  : é a probabilidade de um ponto amostrado ser classificado corretamente, o qual é o mesmo que o estimador  $p$ , em uma distribuição binomial.

Usando-se funções de distribuição, a variância de  $p$  pode ser assim calculada:

$$s^2_p = \frac{P(1 - P)}{n - 1} \quad (3.2)$$

Padronizando-se  $p$ , através da transformação  $Z$ , obtêm-se:

$$Z = \frac{p - P}{s_p} = \frac{p - P}{\sqrt{\frac{P(1 - P)}{n}}} \quad (3.3)$$

Usando-se a tabela de distribuição normal e estabelecendo-se um intervalo de confiança de 95% de  $Z$ , tem-se:

$$\Pr (-1,96 < Z < 1,96) = 0,95 \quad (3.4)$$

Substituindo-se  $Z$  pela Equação 3.3, o intervalo de confiança de 95% para  $P$  paramétrico pode ser estimado, aproximadamente, por:



$$P_r \left( -1,96 < \frac{p - P}{\sqrt{\frac{P(1-P)}{n}}} < 1,96 \right) = 0,95 \quad (3.5)$$

A Equação (3.5) pode ser usada para calcular os *limites de confiança*, entre os quais P estará incluído com probabilidade de 0,95.

Para o uso do esquema de amostragem acima descrito, o cálculo do número mínimo de amostra deve obedecer a dois critérios: primeiro, que o tempo despendido e o custo envolvido sejam o menor possível; segundo, que os erros do tipo I e II sejam aceitáveis.

b) Avaliação da precisão de identificação dos dados tratados automaticamente

A classificação automática de uma cultura, obtidas através do sistema IMAGE-100, é usualmente avaliada mediante a determinação dos erros de *omissão* (EO) e *inclusão* (EI) cometidos, e da *percentagem de acerto de classificação* (Pa). Para tal, usam-se para a mesma área classificada automaticamente, a partir dos dados digitalizados do LANDSAT - informações obtidas da interpretação visual de fotografias aéreas, que são utilizadas como referência para medir a precisão da classificação automática (Figura 3.14).

Os parâmetros para a determinação dos erros de omissão e inclusão, e a percentagem de acerto de classificação podem ser estabelecidos como mostra a Figura 3.15.

Neste caso, tomando-se a cultura da cana-de-açúcar como exemplo, e observando-se a Figura 3.15, nota-se que AT é a área total do segmento ou área de treinamento; AR é a área real da cana-de-açúcar, segundo informações obtidas por fotografias aéreas; AC é a área classificada como cana-de-açúcar pelo sistema IMAGE-100, a partir de dados

digitalizados do LANDSAT; e ACC é a área classificada corretamente como cana-de-açúcar pelo sistema IMAGE-100.

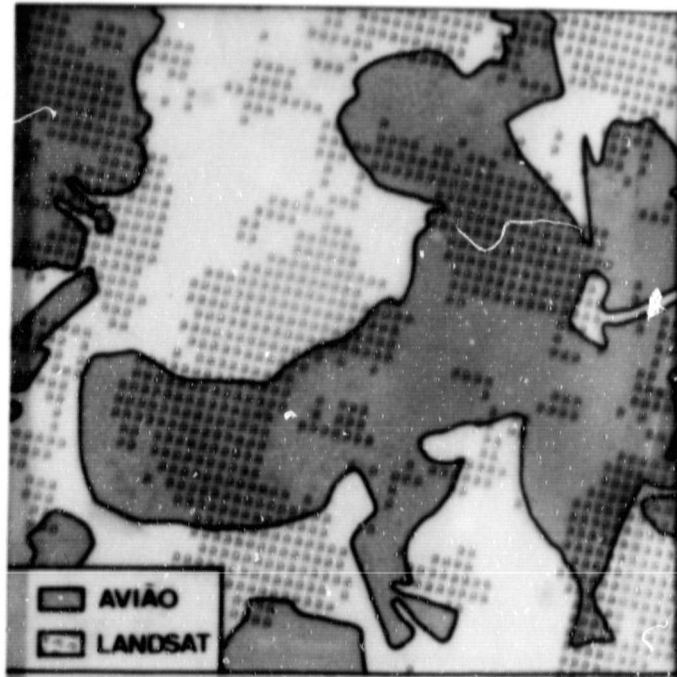


Fig. 3.14 - Superposição da interpretação visual de fotografia aérea sobre a mesma área, classificada automaticamente, a partir de dados digitalizados do LANDSAT.

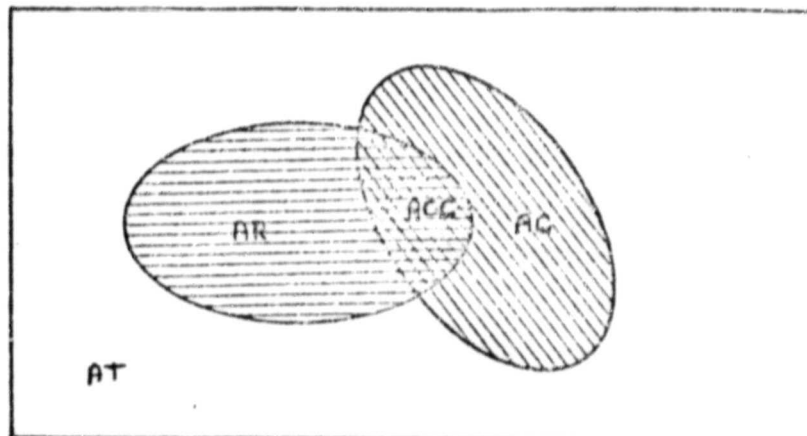


Fig. 3.15 - Esquema demonstrativo dos elementos para avaliação de dados, obtidos com a classificação automática de cultura agrícola.

Desse modo, o erro de inclusão, definido como a razão entre a área classificada incorretamente pelo IMAGE-100 e a área que não possui cultura de cana-de-açúcar - conhecida através das informações obtidas por fotografias aéreas, pode, em termos percentuais, ser assim de terminado:

$$EI = \frac{AC - ACC}{AT - AR} \times 100.$$

e a percentagem de acerto de classificação é calculada como se segue:

$$P_a = \frac{ACC}{AR} \times 100$$

Finalmente, define-se o erro de omissão como:

$$EO = \frac{AR - ACC}{AR} = 100 - P_a$$

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

CAPÍTULO 4

APLICAÇÕES DO PROGRAMA DE SENSORIAMENTO REMOTO DO INPE NA AGRICULTURA

O Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) vem, desde 1975, desenvolvendo o Projeto Estatísticas Agrícolas (EAGRI), cujo objetivo principal é desenvolver e transferir metodologias de utilização de técnicas de sensoriamento remoto que auxiliem nos sistemas de previsão de safras do País.

Para a realização desse projeto estão sendo utilizados dados obtidos por dois tipos de sensores: o *fotográfico* (câmera métrica RC-10) a bordo de aeronave, cujos dados são analisados segundo a metodologia da fotointerpretação convencional; e o não fotográfico (Multispectral Scanner Subsystem - MSS), a bordo de satélite, cujos dados são analisados usando-se as técnicas tanto de análise visual (imagens fotográficas) como automática (fitas compatíveis com o computador CCT), através do sistema analisador multispectral - o IMAGE-100.

O Município de Jardinópolis com uma área de 552 km<sup>2</sup>, situado na Divisão Regional Agrícola de Ribeirão Preto (DIRA-RP), no estado de São Paulo (Figura 4.1), foi a primeira área escolhida para servir de *área piloto*. Segundo Batista et alii 1976, utilizando fotografias aéreas de filme infravermelho colorido falsa cor, na escala de 1:20.000, foram realizados estudos para identificação das culturas de algodão, amendoim, arroz, café, cana-de-açúcar, citrus, milho, pastagem e soja, sendo então gerado para esse Município um mapa temático que contém a distribuição espacial de todas aquelas culturas. A seguir, para essa mesma área piloto, foi feita uma classificação automática, usando dados digitalizados do LANDSAT-2 através do I-100, somente para os temas algodão, cana-de-açúcar, soja e pasto. Com relação ao tema cana-de-açúcar, foi feita uma comparação dos resultados obtidos de área utilizando os dois métodos. No levantamento feito a partir de fotografias aéreas, o valor da avaliação de área ocupada com a cultura foi de 2.509 ha. A área obtida através da classificação automática, usando dados do LANDSAT, foi de 2.140 ha, ou seja, uma diferença de 14% em relação à área obtida através de fotografias aéreas.

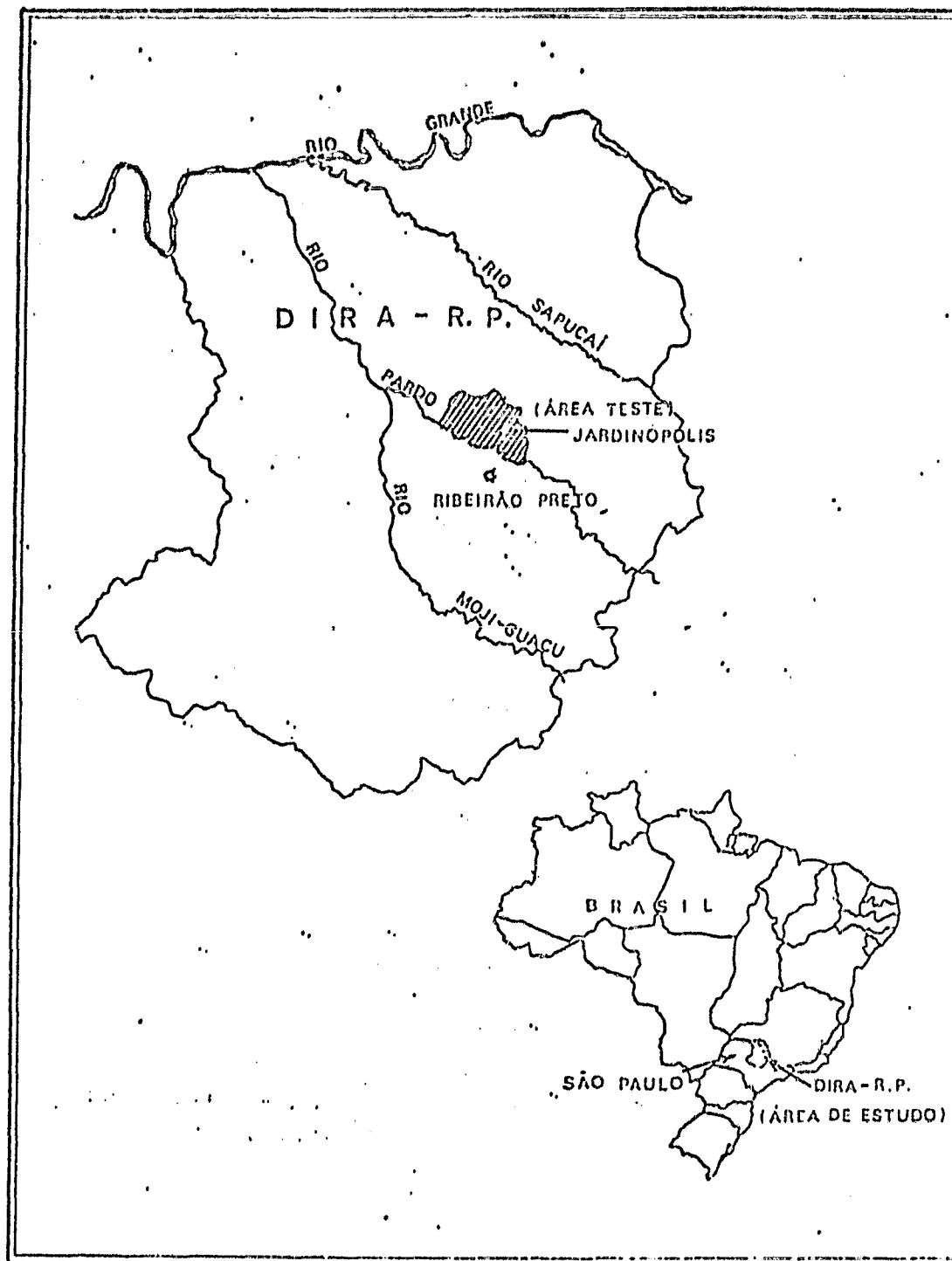


Fig. 4.1 - Mapa de situação que mostra a "área de estudo" representada pela DIRA-RP, e a "área piloto" representada pelo Município de Jardinópolis no Estado de São Paulo.

Em 1976, Batista et alii (1977), dando prosseguimento aos estudos de pesquisa do Projeto EAGRI, realizaram, no Município de Jardinópolis, um experimento que objetivou estudar a viabilidade do uso amostral de fotografias aéreas coloridas no infravermelho, na escala de 1:10.000, para identificação e avaliação de áreas de culturas de expressão econômica. A fotointerpretação dos temas algodão, café, cana, soja e pomar teve um índice de 100% de acerto. No caso da cana-de-açúcar, a área encontrada foi de 5.237 ha. Tal resultado demonstra que de 1975 a 1976 houve, no Município de Jardinópolis um incremento de área de cultura de cana da ordem de 109%.

No ano de 1977, foram desenvolvidas, paralelamente, duas pesquisas. A primeira, Mendonça et alii (1978) realizaram um estudo comparativo de interpretação automática e visual em imagens LANDSAT, visando à identificação da cultura da cana-de-açúcar. Neste estudo, utilizando dados de diferentes datas de passagem do MSS do LANDSAT, foi feita a identificação e avaliação da cana-de-açúcar numa área de 1.814,20 ha, situada dentro do Município de Jardinópolis, através dos métodos de análise automática e visual. A Tabela 4.1 mostra, comparativamente, os resultados obtidos desse estudo e o cálculo da precisão dos dois métodos, em relação à área de 1.563,32 ha, obtida a partir de fotografias aéreas.

A segunda pesquisa do ano de 1977 do projeto EAGRI, realizada por Batista et alii (1978), teve as mesmas características da pesquisa desenvolvida por Mendonça et alii (1978), citada anteriormente, com a diferença de que a área de estudo dessa segunda pesquisa abrangia uma área de 400.900 ha, cuja localização é mostrada na Figura 4.2.

TABELA 4.1

RESULTADOS COMPARATIVOS PARA MEDIR A PRECISÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE  
AUTOMÁTICA E VISUAL DO TEMA CANA-DE-AÇÚCAR, USANDO-SE DADOS  
DO LANDSAT, EM RELAÇÃO À ÁREA DE 1.563,32 HA,  
OBTIDA A PARTIR DE FOTOGRAFIAS AERÉAS

| DATA DA PASSAGEM<br>DO LANDSAT | ANÁLISE<br>AUTOMÁTICA<br>(em Ha) | ANÁLISE<br>VISUAL<br>(em Ha) | PRECISÃO DE IDENTIFICAÇÃO<br>(%) |                   |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
|                                |                                  |                              | ANÁLISE<br>AUTOMÁTICA            | ANÁLISE<br>VISUAL |
| 07.FEV.1977                    | 1.263,50                         | 1.356,25                     | 81                               | 87                |
| 25.FEV.1977                    | 1.034,60                         | 1.312,50                     | 66                               | 84                |
| 15.MAR.1977                    | 1.030,00                         | 1.343,75                     | 66                               | 86                |
| 01.JUL.1977                    | 1.297,40                         | 1.393,75                     | 83                               | 89                |

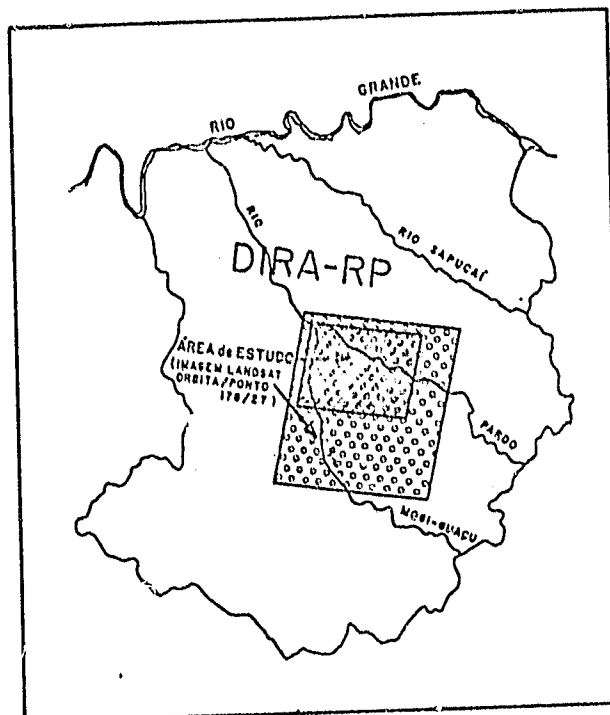


Fig. 4.2 -- Localização da área de estudo, delimitada na imagem LANDSAT (178/27) na Divisão Regional Agrícola de Ribeirão Preto (DIRA-RP).

A realização desse trabalho permitiu aos autores tirar as seguintes conclusões:

- a) "entre os dados disponíveis do LANDSAT, a passagem de 01.07.77 constituiu-se na época mais propícia para se proceder a avaliação de área ocupada com cana-de-açúcar, seja usando o método de análise visual, seja o método de análise automática";
- b) "o emprego do método de análise visual ou automático com dados do satélite LANDSAT, para identificação e avaliação de áreas ocupadas com cana-de-açúcar, não diferiu significativamente entre si, quanto à precisão;
- c) "os resultados obtidos mostraram uma precisão da avaliação das áreas ocupadas com cana-de-açúcar, usando-se o método de interpretação automática, com o I-100, acima de 80%;
- d) "os fatores relacionados com a própria cultura da cana-de-açúcar tais como estágio de desenvolvimento, época de plantio e de colheita, e variedade - influenciaram decisivamente na resposta espectral da cana, afetando, conseqüentemente, a precisão de identificação e avaliação de sua área, fosse a interpretação feita na imagem fotográfica ou em CCT (fitas compatíveis com o computador)".

A partir de 1978, em função da experiência adquirida e considerando-se a complexidade desse projeto, foi necessário o estabelecimento de prioridades para a execução das diversas etapas, em função das seguintes considerações:

- 1) O ciclo das principais culturas anuais na área de estudo está, de um modo geral, compreendido entre outubro e maio. Esse período coincide com o de maior precipitação pluviométrica do ano e conseqüentemente, com o de maior cobertura de nuvens. Tal fato, mesmo considerando-se a repetitividade de 18 dias do LANDSAT,



constitui, na prática, não um problema insuperável, mas bastante restritivo.

- 2) Outra dificuldade que se apresenta é o padrão de cultivo. Várias culturas de expressão econômica da região em estudo são plantadas em áreas relativamente pequenas, em relação à resolução espacial do satélite LANDSAT, o que limita a "análise espectral discriminatória" destas culturas.

Em face dessas considerações estabeleceram-se dentro do objetivo geral do projeto EAGRI, dois objetivos específicos:

- a) Identificação de áreas preparadas para plantio (solo nu)

Tecnicamente, a adoção deste objetivo foi devida a dois fatores:

- na região estudada, o solo é preparado de junho a outubro, período de grande probabilidade de obtenção de imagens livres de cobertura de nuvens; e
- o alto contraste existente entre o solo nu e alvos vizinhos (cobertos por vegetação) determina uma maior precisão de classificação (Batista et alii, 1978).

Desse modo, Assunção e Duarte (1980), numa área de 72.000 ha, localizada na DIRA-RP, realizaram um estudo com o objetivo de desenvolver uma metodologia para identificação e avaliação de áreas preparadas para plantio (SOLU NU), utilizando dados digitalizados do LANDSAT, com suporte em fotografias aéreas coloridas no infravermelho na escala de 1:20.000. A precisão média obtida da classificação desse tema foi de 93%.

b) Identificação de áreas cultivadas com cana-de-açúcar e trigo

Além da importância econômica de que se reveste este objetivo, adicionaram-se as seguintes vantagens:

- A possibilidade de utilização de imagens de todas as épocas do ano, especialmente no período seco em que há menor probabilidade de nuvens;
- as áreas de cultura da cana-de-açúcar cobrem grandes extensões contínuas e são, por isso, alvos facilmente identificáveis a níveis orbital. (Batista et alii, 1978).

Aproveitando tais vantagens, Mendonça (1980) desenvolveu um projeto de pesquisa, durante os anos de 1978 e 1979, para testar uma metodologia que utiliza técnicas de sensoriamento remoto como processamento digital dos dados do LANDSAT, para identificar e avaliar áreas ocupadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Para a realização dessa pesquisa, foi determinada, inicialmente, a área de maior concentração de cana-de-açúcar dentro do Estado de São Paulo, a qual foi considerada como área de estudo (Figura 4.3). Dentro da área de estudo foram selecionados dez segmentos com área de 10 km x 20 km para serem aerofotografados com câmera RC-10 e filme Aerochrome IR 2443 da KODAK (Figura 4.4). Esses segmentos serviram para obtenção de áreas de treinamento, visando à classificação automática de dados do LANDSAT através do sistema IMAGE-100. Para se proceder à classificação automática foi feita, primeiramente, a divisão da área de estudo em quatro estratos coincidentes com as quatro órbitas de passagem do LANDSAT (Figura 4.4). Os resultados obtidos da classificação apresentaram uma percentagem total de classificação correta para cada estrato, assim distribuídos; estrato 206 (79,56%); estrato 192 (95,59%); estrato 178 (84,42%); e estrato 164 (84,11%).

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY



Fig. 4.3 - Localização da área de estudo em relação ao Estado de São Paulo.

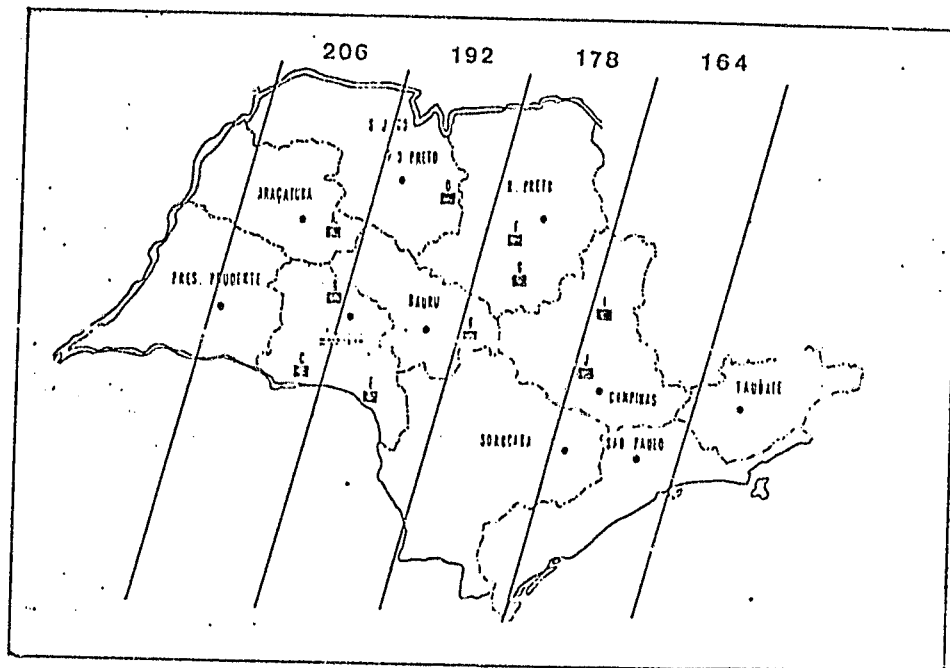


Fig. 4.4 - Distribuição das áreas de treinamento dentro de cada estrato em relação ao Estado de São Paulo.

Utilizando os parâmetros espectrais de cada segmento do trabalho anterior, Mendonça et alii (1980) obtiveram o primeiro inventário da cultura da cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, a partir de dados do LANDSAT, tratados através do IMAGE-100 (I-100), cujo procedimento adotado foi o seguinte:

- dividiu-se cada cena do LANDSAT em 9 módulos, correspondendo cada um a uma área de 383.400 ha.;
- utilizando-se os parâmetros espectrais da cana-de-açúcar do segmento pertencente ao estrato ou à órbita, fez-se a classificação automática da cultura de cada módulo, segundo o sistema "MAXVER", que usa o critério de máxima verossimilhança, (Velasco et alii, 1978);
- a área da cultura da cana-de-açúcar, obtida a partir da classificação de cada módulo, foi avaliada através do programa "AREA", inserido no sistema I-100.

Em 1979, Mendonça et alii (1981) repetiram o inventário de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, utilizando imagens LANDSAT, na escala de 1:250.000, agora tratadas visualmente. Os critérios básicos para a identificação da cultura foram a sua caracterização espectral, nos canais 5 e 7, e a sua variação temporal, observada em diferentes passagens do satélite LANDSAT. Através dessa técnica foi possível mapear tanto a cana, cuja cobertura foliar era capaz de oferecer características espectrais bem definidas, quanto a cana cortada. A área obtida de cana-de-açúcar em toda a região estudada foi de 801.950 ha e sua distribuição espacial é mostrada na Figura 4.5. Neste levantamento, o intervalo de identificação correto calculado variou de 87,11% a 94,71%.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

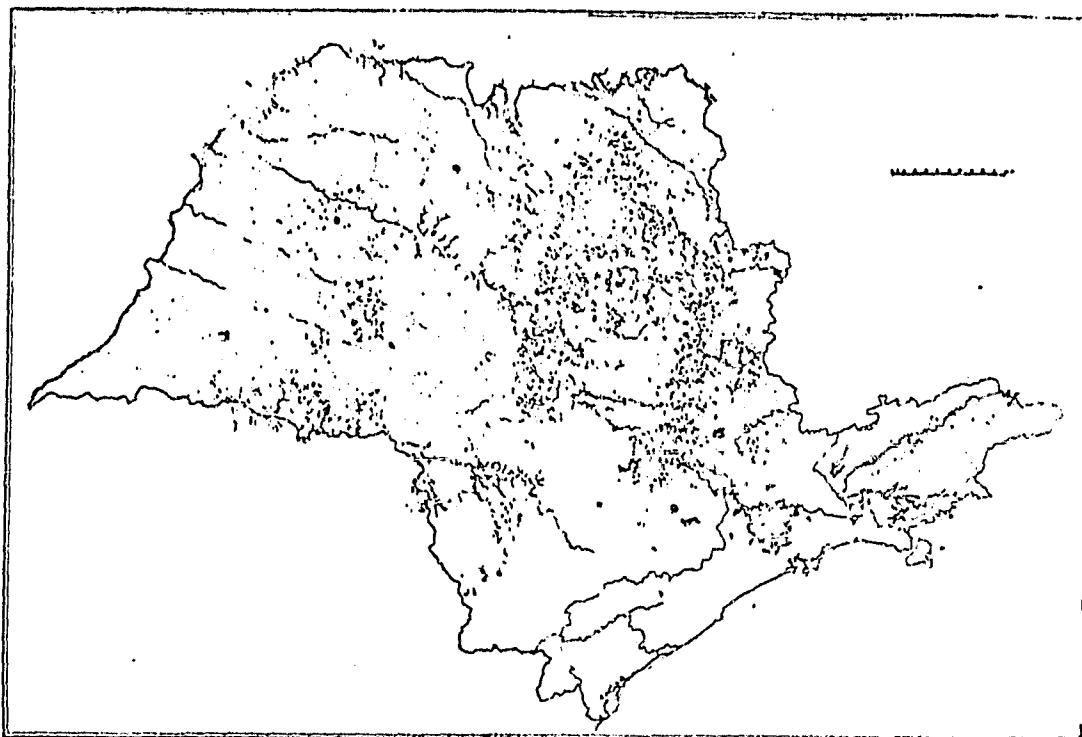


Fig. 4.5 - Mapa temático da cultura de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, obtido através de imagens do LANDSAT.

Seguindo a mesma metodologia utilizada para a cana-de-açúcar, foi desenvolvido também pelo INPE um projeto onde se buscou viabilizar o uso de dados multiespectrais, obtidos através do MSS do LANDSAT, para identificação e avaliação de áreas ocupadas com trigo. A área escolhida para estudo foi a região tritícola, ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, conforme pode-se ver na Figura 4.6.

Esse estudo foi desenvolvido em duas partes. A primeira utilizando-se apenas fotografias aéreas coloridas no infravermelho, na escala de 1:20.000, sobre três segmentos de 20 km x 40 km, previamente selecionados dentro da área de estudo (Figura 4.6). Foram identificados, além do trigo, os seguintes temas: cevada, culturas diversas (colza, tremoço, linhaça), solo preparado, pousio, pastagem e mata. Com relação à cultura de trigo, foi possível caracterizar na fotografia aérea, com apoio de trabalho de campo, as variedades CNT.7, Maringã, Jacui, S.31, PAT.19.

Através da análise do padrão fotográfico das fotos também foi possível detectar a presença do fungo, que provoca a doença conhecida como "mal do pé", cujo efeito é o estiolamento prematura da planta (Mendonça et alii, 1980).

A segunda parte do projeto trigo consistiu na classificação automática dessa cultura, utilizando-se dados do LANDSAT em formato digital. A metodologia básica consistiu na tomada de amostras de treinamento, e, a seguir, foi feita a classificação do tema trigo e dos outros temas: solo nu, mata e pousio.

O desempenho médio dessa classificação foi de 71.22%. Vários fatores contribuíram para o baixo desempenho dessa classificação, sendo o principal deles a ocorrência de adversidades climáticas, as quais afetaram drasticamente o padrão de resposta espectral do trigo (Mendonça et alii 1981).

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

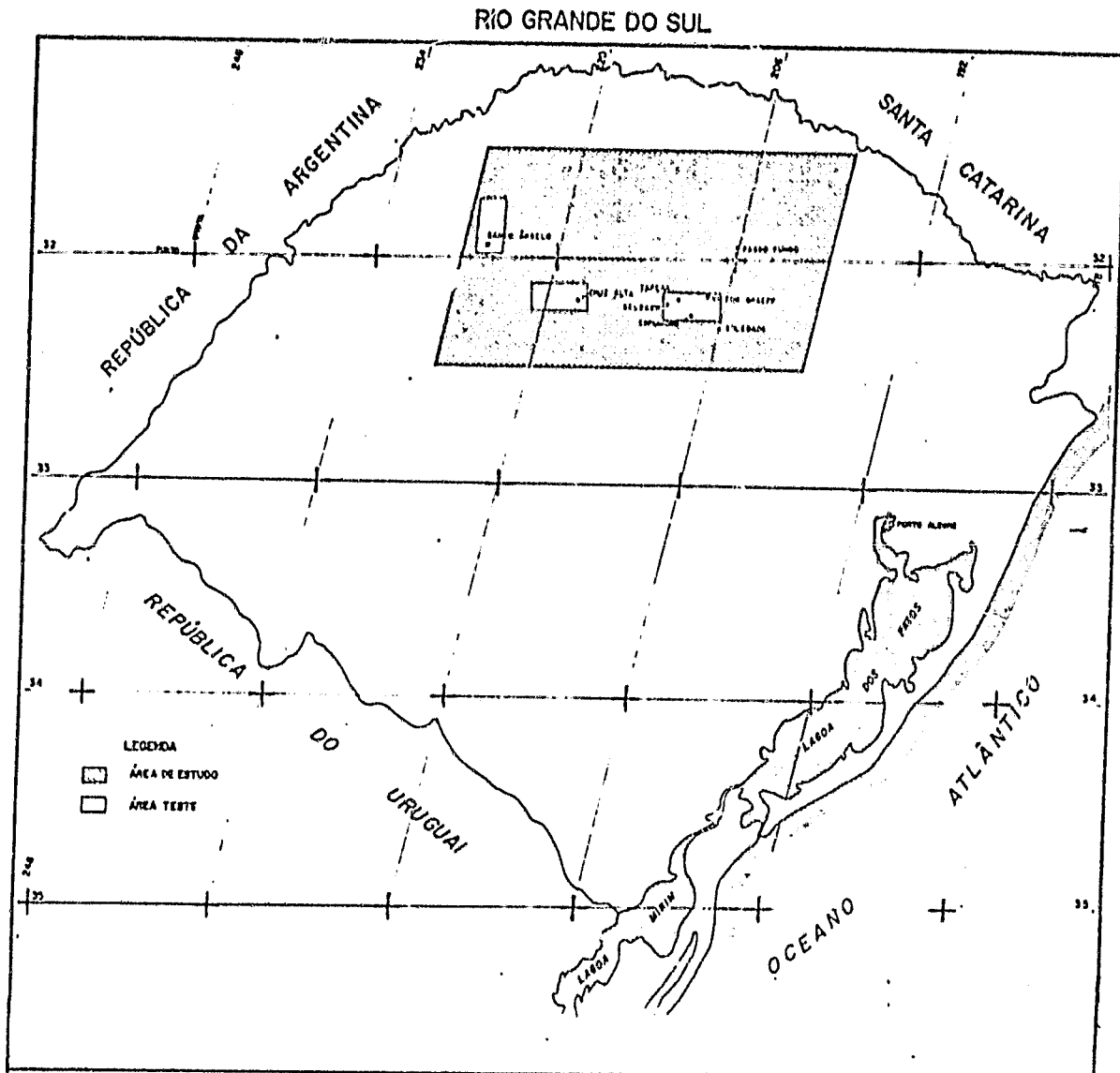


Fig. 4.6 - Área de estudo e os três segmentos de 20 km x 40 km.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ASSUNÇÃO, G.V.; DUARTE, V. *Avaliação de áreas preparadas para plantio, utilizando-se dados digitalizados do LANDSAT, através de tratamento automático no I-100.* São José dos Campos, INPE, set., 1980. (INPE-1910-RPE/1243).
- BATISTA, G.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C.; NOVAES, R.A. *Uso de dados orbitais para identificação e avaliação de áreas de cana-de-açúcar.* São José dos Campos, INPE, abr., 1978. (INPE-1228-NTE/116).
- BATISTA, G.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C.; NOVAES, R.A. *Uso de sensores remotos a bordo de satélite e aeronave na identificação e avaliação de áreas de culturas para fins de previsão de safras.* São José dos Campos, INPE, abr., 1978. (INPE-1229-NTE/103).
- BATISTA, G.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; CHEN, S.C.; TARDIN, A.T.; NOVAES, R.A.; TOSCANO, L.P. *Estudo da viabilidade do uso amostral de fotografias aéreas (infravermelho colorido) para estimativa de áreas cultivadas em Jardinópolis - SP.* São José dos Campos, INPE, abr., 1977. (INPE-1228-NTE/116).
- BATISTA, G.T.; NOVAES, R.A.; TARDIN, A.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; SANTOS, J.R. dos; CHEN, S.C.; TOSCANO, L.P. *Atividades do projeto estatísticas agrícolas durante o ano de 1975.* São José dos Campos, INPE, fev., 1976. (INPE-830.PPr/012)
- BAUER, M.V. Technological basis and applications of remote sensing of the earth's resources. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1):3-9, jan., 1976.
- BAUER, M.V.; CIPRA, J.E. Identification of agricultural crops by computer processing of ERTS MSS data. In: *Symposium on significant results obtained from the earth resources technology satellite-1,3*, Washington, D.C., 1973. Proceedings. v.1, Sec. A, p. 205-212.



- BAUMGARDNER, M.F.; HENDERSON, Jr. A. *Mapping soils, crops, and rangelands by machine analysis of multitemporal ERTS-1 data*. West Lafayette, IN, Purdue, University, 1973. (LARS information note 121173).
- CARVALHO, V.C. de; SHIMABUKURO, Y.E. *Apresentação de um programa que calcula as sensibilidades relativas de combinação de filtros com o filme infravermelho colorido*. São José dos Campos, INPE, out., 1974. (INPE-555-RI/248).
- CAVALCANTI, L.A. *Correlação radiométrica dos dados enviados pelo sistema MSS do satélite ERTS*. São José dos Campos, INPE, dez., 1975. (INPE-786-NTI/039).
- CHEN, S.C. *Precisão de classificação do mapa de distribuição de culturas, obtido a partir de imagens LANDSAT*. São José dos Campos, INPE, set., 1980. (INPE-1889-RPE/233).
- COLWELL, R.N.; OLSON, D.L. Thermal infrared imagery and its use in vegetation analysis by remote aerial reconnaissance. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY. *Selected papers on remote sensing of environment*. Willow Run Laboratories, Institute of Science and Technology, University of Michigan, ed., 1966. p. 77-118.
- COTRISA. *Trigo do plantio à comercialização*. S.N.T. (Série Técnica, 2).
- DIETRICH, D.L.; FRIES, R.F.; EGBERT, D.D. Agricultural inventory capabilities of machine processed LANDSAT digital data. In: NASA. *Earth Resources Survey Symposium; proceedings of symposium held in Houston, Tx, June 9-12, 1975*. Washington, DC, 1975, V.1-A, p. 221-232. (NASA TM X-58168).
- DRAEGER, W.C. Agricultural applications of ERTS-1 data. In: NASA. *Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite - 1; proceedings of a Symposium held at New Carrollton, MD, mar 5-9, 1973*. Washington, DC, 1973, V.1-2, p. 197-204. (NASA SP-327).

- DRAEGER, W.C.; NICHOLS, J.D.; BENSON, A.S.; LARRABEE, D.G.; SENKUS, W.M.; HAY, C.M. Regional agriculture surveys using ERTS-1 data. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, DC, 1973. Proceedings. Washington, NASA, 1973, V.1-A, p. 117-125
- ERB, R.B. The utility of ERTS-1 data for applications in agriculture and forestry. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, DC, 1973. Proceedings. Washington, NASA, 1973, V. 1-2, p 75-85.
- ESTES, J.E.; SIMONETT, D.S. Fundamentals of Image Interpretation, In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Fundamentals of Image Interpretation*. Falls Church, VA., c 1975. Cap. 14, p. 869-1076.
- GATES, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. COMMITTEE ON REMOTE SENSING FOR AGRICULTURAL PURPOSES. *Remote sensing with special reference to agricultural and forestry*. Washington, D.C., National Academy of Sciences, 1970. Cap. 5, p. 223-224.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY (GE). *Image-100 interactive multispectral image analysis system*. User Manual. Daytona, 1975.
- HALL, F.J.; BAUER, M.E.; MALILA, W.A. *First results from crop identification technology assessment for remote sensing (CITARS)*. Lafayette, IN. Purdue University, 1974. (LARS information note 041874).
- HARDING, E.A.; SCOTT, R.B. *Forest inventory with LANDSAT phase II*. Olympia, W.D. State of Washington Department of Natural Resources, 1978. p.110.
- HORTON, M.L.; HEILMAN, J.L. Crop identification using ERTS imagery In: NASA. Symposium on Significant Results obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1; proceedings of a symposium held at New Carrollton, MD, Mar., 5-9, 1973. Washington, 1973, V. 1-A, p. 27-33. (NASA SP-327).

- JOHNSON, C.W.; COLEMAN, V.B. Semi-automatic crop inventory from sequential ERTS-1 imagery. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, DC, 1973. Proceedings. Washington, DC, NASA, 1973, V.1-A, p. 19-25.
- KNIPLING, E.B. Leaf Reflectance and Image formation on color infrared film. In: JOHNSON, P.L. *Remote Sensing in Ecology*. Athens, G.A. University of Georgia Press, 1969, Cap. 2, p. 17-29.
- KNIPLING, E.B. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1(3):155-159, 1970.
- KOFFLER, N.F.; CAVALLI, A.C.; CHIARINI, J.V.; NOGUEIRA, F. de P. In ventário canavieiro com auxílio de fotografias aéreas - a Grande Região de Piracicaba no ano safra 1978/79. *Boletim técnico FLAVALSU CAR*, Série A 1(2):3-38, dez. 1979.
- KRUSE, P.W.; McGLAUCHLIN, L.D.; McQUISTAN, R.B. Optical properties of the atmosphere. In: *Elements of infrared technology: generation transmission and detection*. New York, NY, John Wiley, 1962. Cap. 5, p. 164.
- LABORATORY FOR AGRICULTURAL REMOTE SENSING (LARS). Agricultural remote sensing research program. In: ———. *Remote multispectral sensing in agriculture*. Lafayette, Indiana, Purdue University, 1968. Cap. 2, p. 6-7.
- LANDGREBE, D. An evaluation of machine processing techniques of ERTS-1 data for user application. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, Washington, D.C., 1973. Proceedings. Washington, D.C. NASA 1973, v.1-A, p. 41-47.
- LUCHT, L.A.M. *O uso da temperatura de radiação para detectar o estresse de água da cultura da cana-de-açúcar*. São José dos Campos, INPE, jun., 1980 (INPE-1967-TDL/028).
- MACDONALD, R.B.; HALL, F.G.; LACIE: An experiment in global crop forecasting. *The LACIE Symposium*, Houston, TX, Oct. 23-26, 1978. 32 p.

MENDONÇA, F.J. *Uso de dados do LANDSAT para avaliação de áreas ocupadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*. Tese de mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos, INPE. 1980. (INPE-1713-TDL/023).

MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T. *Estudo comparativo de interpretação automática e visual em imagem LANDSAT visando a identificação da cultura da cana-de-açúcar*. São José dos Campos, INPE, maio, 1978. (INPE-1265-NTI/104).

MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L. SHIMABUKURO, Y.E.; TARDIN, A.T.; NOVAES, R.A.; CHEN, S.C. *Utilização de dados do LANDSAT para inventário da cana-de-açúcar do Estado de São Paulo*. São José dos Campos, INPE, jan., 1980. (INPE-1668-NTE/157).

MENDONÇA, F.J.; COTTRELL, D.A.; TARDIN, A.T.; LEE, D.C.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; MOREIRA, M.A.; LIMA, A.M. de; MAIA, F.C.S. *Cultura de trigo - identificação e avaliação de áreas através de dados do LANDSAT*. São José dos Campos, INPE, maio, 1981. (INPE-2054-RPE/300).

MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CHEN, S. C.; LUCHT, L.A.M.; MOREIRA, M.A.; LIMA, A.M. de; MAIA, F.C.S.; *Levantamento da área canavieira do Estado de São Paulo, utilizando dados do LANDSAT - Ano Safra 1979/80*. São José dos Campos, INPE, mar., 1981. V.I. (INPE-2021-RPE/288).

MENDONÇA, F.J.; LIMA, A.M. de; TARDIN, A.T.; SANTOS, A.P. dos; COTTRELL, D.A.; LEE, D.C.L.; MAIA, F.C.S.; LUCHT, L.A.M.; MOREIRA, M.A.; NOVAES, R.A.; SHIMABUKURO, Y.E. *Cultura do trigo - identificação e avaliação de áreas através do filme Aerochrome 2443 (infravermelho falsa cor)*. São José dos Campos, INPE, set., 1980. (INPE-1894-RPE/235).

MISRA, P.N.; WHEELER, S.G. Crop classification with LANDSAT multispectral scanner data. In: *Pattern Recognition*. Great Britain Pergamon, 1978. Cap. 10. p.1-13-

- MYERS, V.I. Crops and soils. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church, VA., 1975. V.2. p. 1715-1805.
- MYERS, V.I.; HEILMAN, M.D.; LYON, R.J.P.; NAMKEN, L.N.; SIMONETT, D.; THOMAS, J.R.; WIEGAND, C.L.; WOOLEY, J.T. Soil, Water and Plant Relation. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. COMMITTEE ON REMOTE SENSING FOR AGRICULTURAL PURPOSES. *Remote Sensing with special reference to agriculture and forestry*. Washington, DC. National Academy of Sciences. 1970. Cap.6, p. 253-297.
- PIERRE, W.H.; PESER, J.; SHAW, R. *Plant environment and efficient water use*. Medison, WI, American Society of Agronomy and soil Science Society of American, 1966, p. 30.
- SAFIR, G.R.; MYERS, W.L.; MALILA, W.A.; MORGENSTERN, J.P. Applications of ERTS-1 data to analysis of agricultural crops and forests. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SIMPOSIUM, 3., Washington, DC., 1973. Proceedings. Washington DC., NASA, 1973, V.1-A. p. A3-180.
- SCHRUMPF, B.J. Natural Vegetation Inventory. In: NASA. *Symposium on significant results obtained from earth resources technology satellite-1.*, proceedings of a symposium held at New Corrolton, MD, mar 5-9, 1973. Washington, DC, 1973, V.1-A, p.59-66. (NASA SP-307)
- VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C.; SOUZA, R.C.M. *Sistema marver - Manual do Usuário*. São José dos Campos, INPE, jul., 1978. (INPE-1315-NTI/110).
- WALLACE, G.A. Remote sensing for detecting feedlot Runoff. *Photogrammetric Engineering*, 39(9):949-958, sep., 1973.
- WESTIN, F.C.; LEMME, G.D. LANDSAT spectral signatures: studies with soil associations and vegetation. *Photogrammetric Engineering*, 46(3):315-325, mar., 1978.
- WIEGAND, C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMAN, A.H.; RICHARDSON, A.J. Vegetation density as deduced from ERTS-1 MSS response. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3. Washington, DC., 1973. Proceedings. Washington, DC, NASA, 1973, V.1-A, p. 93-116.

WIGTON, W.H.; STEEN, D.H.V. Crops identification and acreage  
measurement utilizing ERTS imagery. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY  
SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, DC., 1973. Proceedings.  
Washington, DC., NASA, 1973, V. 1-A, p. 87-92.